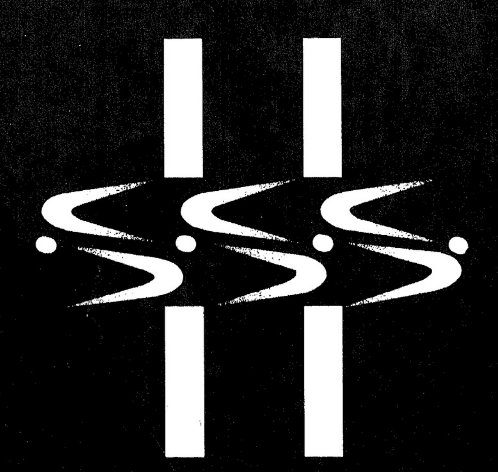
التداخل الضوئى والألياف



تأليف

الدكتور / نايل بركات   الدكتور / أحمد أمين حمزة





اهداءات ١٩٩٤
دار النشر للجامعات المصرية
الاسكندرية

التداخل الضوئي والألياف

* حقوق النشر :

- الطبعة الأجنبية

English Edition :-

Interferometry of Fibrous Materials
by N. Barakat / A. A. Hamza
The Institute of Physics
I.O.P Publishing U.K.

- الطبعة العربية

Arabic Edition :-

التداخل الضوئى والألياف

أ.د. نايل بركات - أ.د. أحمد أمين حمزه

جميع حقوق الطبع والنشر محفوظة للناشران :

* دار النشر للجامعات المصرية

٤١ ش شريف - القاهرة

ت : ٢٩٣٤٦٠٦ - ٢٩٣١٢٣٤

* I.O.P Publishing

Techno House, Redcliffe way

Bristol BSI 6NX England

التداخل الضوئى والألياف

تأليـف

الدكتور / **نايل بركات** الدكتور / **أحمد أمين حمزة** .





شكر وعرفان

يتوجه المؤلفان بخالص شكرهما لمؤسسات النشر والجهات العلمية الآتية لتفضلهم بالموافقة على السماح باستخدام بعض الجداول والاشكال وصور التداخل الضوئي ومنح الموافقة على تضمينها بالكتاب ، وهم :

IOP Publishing Ltd (اشكال ٣-١ ، ٣-٢ ، ٦-٢ ، ٦-٨ ، ٦-٩ ، ٦-١٠ ، ٦-١١ ، ٦-١٩ ، ٦-٢٠ ، الجدول رقم ٣-٢)

McGraw-Hill publishing Company (الشكل ٣-٥)

Textile Research Institute (اشكال ٤-٩ ، ٦-٣ ، ٦-٥ ، ٦-١٤)

Journal of Microscopy (اشكال ٥-٤ ، ٥-١٢ ، ٩-٦ ، ٩-٧)

Optical Society of America (اشكال ٦-١٣ ، ٧-٧ ، ٧-٨ ، ٨-١)

Elsevier Applied Science Publishers Ltd (شكل ٦-٢١)

The Textile Institute (شكل ٧-٥)

Taylor & Francis Ltd (شكل ٨-٢)

Pergamon Press PLC (اشكال ٨-٣ ، ٨-٤)

Longman (اشكال ٩-٢ ، ٩-٣)

Carl Zeiss Jena (شكل ٩-٥)

تقديم

حرص الأستاذ الدكتور نايل بركات والأستاذ الدكتور أحمد أمين حمزه منذ بدء حياتهما العلمية على الاخلاص والالتزام بمجال بحوثهما العلمية وهو مجال استخدام سبل التداخل الضوئى ودراسة الألياف البصرية ، ولذلك فإننا نرى فى هذا الكتاب الخلفية العلمية التى يجب أن يتزود بها شباب الباحثين للمضى قدما فى هذا الموضوع العلمى الحافل بما يجمع بين دقة البحث العلمى البحت والتطبيق . ورغم أن علم البصريات كان من فروع الفيزياء الأولى التى أثارت اهتمام العلماء فقد اظهرت السنوات الأخيرة أن البصريات الفيزيائية والتطبيقية مايزال لديها الكثير مما تقدمه فى سبيل التقدم الحضارى .

وتتكون الالياف البصرية من شعيرات تتكون كل منها من نوعين مختلفين من الزجاج . يوجد الأول فى وسط أو لب الشعيرة ويكون الثانى الغلاف الخارجى أو القشرة . فإذا كان معامل انكسار مادة « اللب » اكبر من قيمته للقشرة فان الضوء عند مروره فى الشعيرة يعانى انكسارا كليا عند سقوطه على السطح الفاصل بين اللب والقشرة وبذلك يظل الضوء داخل وسط الشعيرة تماما كما يظل الماء ينساب داخل انبوبة أو كما تتحرك الامواج الميكروئية داخل مرشد الامواج . ولاتتأثر هذه العملية بانحناء الشعيرة ويظل الضوء منحصرا داخلها . ويجب أن يكون الزجاج المستخدم فى صناعة الألياف البصرية غاية فى النقاء وعند ذلك يمكن لشعاع الليزر أن يسير مسافة تزيد على مائة كيلو متر خلال شعيرة بصرية محتفظا بمعظم شدته .

ولقياس معاملات الانكسار فاننا نحتاج لدراسة انتقال الضوء خلال الشعيرة فى اتجاه عمودى على محورها ويستخدم تداخل الضوء لقياس معامل الانكسار . وقد قام المؤلفان بتقديم وصف شامل لتداخل الضوء واجهزته التى تستخدم فى مختلف ميادين التطبيق . وسيجد الباحثون فى هذا الكتاب جميع مايلزمهم من الاساس العلمى الذى يمكنهم من المضى حثيثا فى هذا المجال الذى تزداد تطبيقاته يوما بعد يوم .

وأننا لنشكر المؤلفين على تقديم هذا الكتاب وترجمته مساعدة للباحثين الشباب المهتمين بهذا المجال .

محمد عبد المقصود النادى

١٩٩٢/٧/٣

الاستاذ الدكتور / محمد عبد المقصود النادى

أستاذ الفيزياء وصاحب المدرسة العلمية فى الفيزياء النظرية

والحاصل على جائز الدولة التقديرية وعلى درجة الدكتوراه فى العلوم D. Sc.

مقدمة الطبعة العربية

أسهم التداخل الضوئى فى العديد من مجالات الفيزياء ، والفيزياء التطبيقية والهندسة . واكتسبت أهمية اسهامه بادخال طرق دقيقة لقياس خصائص فيزيائية على مدى واسع شمل التحكم فى عمليات انتاج العدسات ، وتشطيب الأسطح ، وعلم القياس والمعايرة وصناعة الألياف بانواعها ، الطبيعية كالقطن والصوف ، والتركيبية كالنايلون والبولى استر والالياف البصرية المستخدمة فى التراسل الضوئى .

لذلك ظهرت الحاجة الى مرجع حديث يتناول موضوعات التداخل الضوئى وتطبيقاته على الألياف ومن ثم يجد طلاب الدراسات العليا بكليات العلوم والهندسة والتربية والمشتغلين فى صناعة الغزل والنسيج والألياف مرجعا عن التداخل الضوئى والألياف سوف يقلل الحاجة الى الرجوع الى البحوث الأصلية ولمن يرغب فى الاستفادة والتعمق سوف يجد مراجع عديدة مذكورة فى نهاية كل باب .

هذه هى النسخة العربية من كتاب ظهر باللغة الانجليزية بعنوانInterferometry of Fibrous Materials ونشر عام ١٩٩٠ ضمن سلسلة البصريات ، والبصريات الالكترونية التى تصدرها دار Adam Hilger للنشر – بريستول – نيويورك واستشعر المؤلفان الحاجة الماسه الى اضافة فصلين فى مقدمة الكتاب عن

أ–انبعاث الضوء وانتشاره وبعض الظواهر الضوئية الاخرى كالحيود والامتصاص والتشتت والتفرق الضوئى وكذلك المصادر الضوئية المستخدمة فى تجارب التداخل .

ب– اشعة الليزر – أهم خصائصها واساس نظرية الفعل الليزرى وخصائص هذه الاشعة .

ويقدم الكتاب وصفا لاستخدام طرق التداخل الضوئى الثنائى والمتعدد وتطبيقاته فى دراسة الالياف . شمل ذلك وصفا وتحليلا لطرق التداخل الضوئى المختلفة وتطبيقاتها فى فحص وتعيين خصائص الألياف . وتركز الاهتمام على النظريات الأساسية التى يقوم عليها

تكوين هدب التداخل الضوئى وتسجيلها واستخلاص المعلومات من خرائط هدب التداخل باستخدام طرق تحليل الصور وتخزينها ثم معالجتها بهدف تعيين بروفيل معامل انكسار مكونات الشعيرة .

كما يحتوى الكتاب على نتائج تطبيق طرق التداخل الضوئى على الألياف . كما تركز الاهتمام على تقديم ووصف العديد من ميكروسكوبات التداخل الضوئى التى يتم انتاجها عالميا على المستوى التجارى

ونهدف من تجميع وتقديم محتويات الكتاب مايلى :

أ- شرح ظاهرة التداخل الضوئى وعرض لمقاييس التداخل الضوئى وتطبيقاتها على الألياف .

ب- لقد حاول المؤلفان الحفاظ على منسوب المعالجة الرياضية لموضوعات الكتاب بالقدر الذى لايتطلب من القارئ مستوى متقدما من الرياضيات لتفادى وضع أعباء إضافية على العلميين والمهندسين المشتغلين بصناعة الألياف الذين عليهم استيعاب حصيلة كبيرة من المعلومات .

جـ- كما نهدف الى تقديم العون الى العلميين والمهندسين مستخدمى تطبيقات التداخل الضوئى على الالياف سواء كان لطلاب الدراسات العليا أو للمشتغلين فى الصناعة لكى تتوفر لهم رؤية واسعة لهذا المجال .

ونتوجه بالشكر الى الاستاذ الدكتور W.T. Welford والاستاذ الدكتور E.R. Pike للعديد من الملاحظات المفيدة والاقتراحات البناءة ، ذلك من خلال الطبعة الانجليزية من هذا الكتاب.

نأمل أن يكون هذا الكتاب مرجعا مفيدا لطلاب السنوات النهائية وطلاب الدراسات العليا لكليات العلوم والهندسة والتربية وكذلك للمشتغلين فى الصناعة فى مجالات تنتج وتستخدم الألياف بانواعها المختلفة .

القاهرة فى يونيو ١٩٩٢

أ.د. نايل بركات　　　*أ.د. أحمد امين حمزه*

محتويات الكتاب

صفحة

صفحة

صفحة

بسم الله الرحمن الرحيم

الفصل الأول

انبعاث الضوء وانتشاره

Emission and Propagation of Light

١/١- الطيف الضوئى : The optical spectrum

يبين الشكل رقم ١/١ خريطة كاملة للموجات الكهرومغناطيسية ، وتوصف هذه الموجات حسب طول موجتها بوحدة الانجستروم Å (١ انجستروم = 10^{-10} متر) أو النانومتر (10^{-9} متر) أو الميكرون (10^{-6} متر) ، أى أن ١ ميكرون = 10^{4} انجستروم .

وينقسم الطيف الضوئى إلى ثلاث مناطق :

أ- منطقة فوق البنفسجية (١٠-٣٩٠ نانومتر) .

ب- منطقة الطيف المرئى (٣٩١-٧٧٠ نانومتر) .

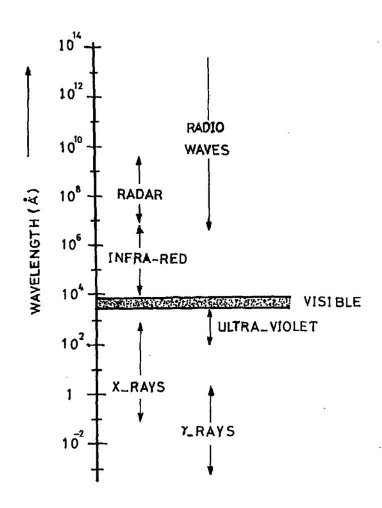
حـ- منطقة الأشعة تحت الحمراء (٧٧١ نانومتر الى ١٠٠٠ ميكرومتر) .

والأطوال الموجية المحددة لهذه المناطق ليست محددة بطريقة قطعية ، فمثلا : يمكن لأحد الأفراد رؤية الطيف المنبعث من ليزر الحقن (Al Ga As) ذات الطول الموجى ٨٠٠ نانومتر ، ويظهر على هيئة حزمة من أشعة الليزر ، لونها أحمر داكن ، إذ ترتبط الرؤية بعمر الرائى ، فكلما قرب من الشيخوخة قصر أطول طول موجى يمكنه رؤيته .

ويرتبط طول موجة الضوء λ بترددها υ بالمعادلة :

$$\upsilon = c/\lambda$$

ويكون طول موجة الضوء λ = ٩٠٤ نانومتر المنبعث من ليزر ارزينات الجاليوم Ga As ذات تردد υ = 3.3×10^{14} هرتز .



شكل رقم (١/١) : الموجات الكهرومغناطيسية

١/٢- طبيعة الضوء : Nature of light

يرى العالم الألماني " ماكس بلانك Max Planck" عام (١٨٩٩) أن الضوء يتكون من عدد من الكم الضوئي quanta أو فوتونات Photons لها طول موجي وتردد معين ، وكذلك كمية محددة من الطاقة E تتناسب طرديا مع تردد الفوتون υ . والعلاقة الآتية تعطى كمية الطاقة المصاحبة E بدلالة التردد υ :

$$E = h\upsilon$$

حيث h مقدار ثابت يساوى ٦,٦٣ × ١٠$^{-٢٧}$ إرج ثانية ، ويعرف بثابت بلانك . ويمثل الفوتون بحزمة موجية Wavepacket لها طاقة وكمية حركة momentum محددتان ، وهى خصائص جسيمية ، ولكن ليس للفوتون كتلة .

وتقترب هذه الحزم الضوئية فى مواصفاتها من الصورة الحديثة لقطار الموجات المترابطة الذى وصلت إلى توصيفه نظرية الترابط بين الموجات ، التى انبثقت بعد اكتشاف الانبعاث المستحث وأكدتها خصائص حزم أشعة الليزر .

وفى عام (١٩١٣) قدم الفيزيائى الدنماركى « نيل بوهر Niels Bohr » نظرية تفسر طيف ذرة الأيدروجين وتعرف باسمه . ويفترض فى نموذج بوهر للذرة أن الألكترونات تدور فى مدارات محددة حول النواة ، ولهذه المدارات مناسيب محددة من الطاقة ، وينتقل ألكترون من مدار إلى مدار آخر مسموح به عن طريق انبعاث أو امتصاص فوتون ذى طاقة ΔE حيث :

$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\upsilon$$

حيث E_2, E_1 هما منسوبا الطاقة ، اللذان يتم بينهما الانتقال ، $E_2 > E_1$.

وتعتبر فكرة وجود مناسيب معينة من الطاقة فى الطبيعة أحد الأفكار الأساسية التى أسهمت فى تطوير ميكانيكا الكم .

وبتطبيق نظرية الكم على كمية التحرك الزاوى angular momentum – لا تأخذ قيم متصلة – نجح بوهر فى اشتقاق المعادلة الآتية التى تربط العدد الموجى wavenumber – لأى خط طيفى منبعث من ذرة الأيدروجين المثارة – بالأعداد الكمية الأساسية principal quantum numbers والتى تعرف بالمدارات :

$$\bar{\upsilon} = \frac{2\pi^2 z^2 e^4 \mu}{h^3 c}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right), \text{ where } \mu = \frac{mM}{m + M}$$

حيث $\upsilon = \frac{1}{\lambda}$ سم$^{-1}$ ، و n_2, n_1 عددان صحيحان ، وهما العددان الكميان الأساسيان للمنسوبين اللذين يتم بينهما انتقال الألكترون ، و m, e هما شحنة وكتلة الألكترون ، و h ثابت بلانك ، و c سرعة الضوء ، و z العدد الذرى ، وهو يساوى واحد فى حالة ذرة الأيدروجين ، و M هى كتلة النواة .

$$\bar{\upsilon} = R_H\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right), \text{ where } R_H = \frac{2\pi^2 z^2 e^4 \mu}{h^3 c}$$

وتسمى R_H ثابت رايدبرج Rydberg constant .

واقترح بعض الباحثين السابقين لبوهر معادلة وضعية تربط $\bar{\upsilon}$ بالعددين الصحيحين ، ووجدوا عمليا أن قيمة R تساوى ١٠٩٦٧٨ سم$^{-1}$. وعند التعويض بقيم M, c, h, m, e فى المعادلة التى أشتقها بوهر تأكد تطابق قيمة R المحسوبة مع النتائج العملية . وكان ذلك أحد المستندات التى تؤيد نظرية بوهر .

وعند تطبيق فرق جهد بين قطبى أنبوبة تفريغ تحتوى على أيدروجين تحت ضغط منخفض ، فإن ذراته تثار . وتتم عمليات الإثارة بتصادم ألكترون مع ذرة ، أو بتصادم ذرة مع ذرة ، وينبعث الضوء كنتيجة لانتقال الألكترونات فى ملايين الذرات المثارة ، حيث تنبعث فوتونات ذات تردد υ :

$$\upsilon = (E_{n1} - E_{n2}) / h$$

E_{n2}, E_{n1} هما منسوبا الطاقة اللذان يتم بينهما انتقال الألكترون .

وتشترك ملايين من هذه الفوتونات التى لها نفس التردد فى تكوين خط الطيف ذى التردد υ ، ويمكن تسجيل هذا الخط على لوح حساس وذلك باستخدام مطياف spectrograph يحتوى على منشور أو على محزوز حيود ، وبذلك ينتج عن إثارة ذرات العناصر وتحليل الأشعة المنبعثة منها خطوط طيف فى المناطق الطيفية المختلفة ، وتظهر خطوط الطيف عند تسجيلها كخطوط مضيئة ، تفصلها مسافات معتمة ، وتختلف المسافات الفاصلة ، وكذلك الشدة الضوئية للخطوط من خط طيفى إلى آخر ، ولكل عنصر خطوط طيف معينة تميزه عن العناصر الأخرى . ووجود خطوط الطيف ذات الأطوال الموجية المميزة لعنصر ما فى الأطياف المنبعثة من عينة مثارة ، دليل قاطع على وجود ذرات هذا العنصر فى العينة ، أى أن الأطياف المنبعثة من عنصر ما هى بصمته المميزة Finger print ، والشدة الضوئية لخط الطيف هى مقياس لتركيز العنصر فى العينة .

ويمكن أن ننظر إلى خطوط الطيف المنبعثة من الذرات المثارة على أنها لغة تعبر هذه الذرات بها عن نفسها . أى أن الذرات تتكلم بلغة الأطياف ، ويعتبر مكان خط الطيف (طوله الموجى) ، وشدته الضوئية ، ووجوده ضمن سلاسل أو مجموعات series ، ووجود تركيب

دقيق لخط الطيف ، وازدواجية خطوط الطيف doublets أو ثلاثيتها triblets والتركيب الدقيق الأدق hyperfine structure هي المعلومات التي تعتمد عليها نظريات التركيب الذرى وخصائص مكونات الذرات ، ومنها نستنتج وجود مناسيب للطاقة داخل الذرة وحساب طاقة المناسيب ، ودوران الألكترونات في مدارات ، وشكل وأنصاف أقطار هذه المدارات ، والدوران المغزلي للألكترونات والنواة ، نستنتج ذلك من الأطياف التي يتم الحصول عليها عمليا من الذرات المثارة .

وتم الحصول على سلاسل طيف ذرة الأيدروجين وتسجيلها ، وهي : سلسلة ليمان Lyman والتي تظهر خطوطها الطيفية في منطقة الأشعة فوق البنفسجية ، وسلسلة بالمر Balmer والتي تظهر خطوطها الطيفية في منطقة الطيف المرئي ، وثلاث سلاسل تظهر في منطقة الأشعة تحت الحمراء وهي لباشن Paschen وبراكت Bracket وفوندFund

$$\bar{\upsilon} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right), n = 2,3,4,5, \text{.........} \quad \text{ultra-violet}$$

$$\bar{\upsilon} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right), n = 3,4,5, \text{...........} \quad \text{visible}$$

$$\bar{\upsilon} = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}\right), n = 4,5,6, \text{......} \quad \text{near infra-red}$$

ولتسجيل سلسلة ليمان يستخدم مطياف مكوناته البصرية من الكوارتز ، حيث أن الزجاج يمتص الأطوال الموجية الأقصر من ٣٧٥٠ انجستروم .

ويلاحظ أن بعض الانتقالات بين مناسيب طاقة مفضلة عن الانتقالات بين مناسيب أخرى ، وهذا هو السبب في اختلاف شدة الخطوط الطيفية الناتجة من إثارة ذرات عنصر معين . وبعض الانتقالات غير مسموح بها forbidden وبعض مناسيب الطاقة غير مستقرة metastable ، وبعضها لايكون مفردا degenerate أي يحتوي على مدارات تحتية sub-levels .

ومن المعلوم أنه عندما تثار ذرة بامتصاص فوتون ذى طاقة $h\,\upsilon$ فإنها سرعان ماتعود إلى حالتها المستقرة بانبعاثها لفوتون له نفس الطاقة .

ويوجد ثلاث انتقالات أساسية بين مناسيب الطاقة والتى تحدث فى الذرات والجزيئات :

١- الامتصاص Absorption .

٢- الانبعاث التلقائى Spontaneous emission .

٣- الانبعاث المستحث Stimulated emission .

وتتضمن الأطياف المنبعثة من مصادر الطيف انبعاثا تلقائيا وانبعاثا مستحثا ولها نفس طول الموجة ، ولكن يختلفان فى درجة الترابط بين الفوتونات المكونة لحزم الأشعة المنبعثة Coherence ، ويكون الانبعاث التلقائى هو الغالب فى المصادر الضوئية العادية - وسنتناول فى الفصل الثانى النسبة بين شدة الانبعاث التلقائى وشدة الانبعاث المستحث فى المصادر الضوئية .

ويستلزم للحصول على أشعة ليزر أن يكون الانبعاث المستحث هو الغالب ، وتنتج فى هذه الحالة أشعة ذات خصائص متميزة .

١/٣- الانعكاس والانكسار والاستقطاب :

Reflection, refraction and polarization of light

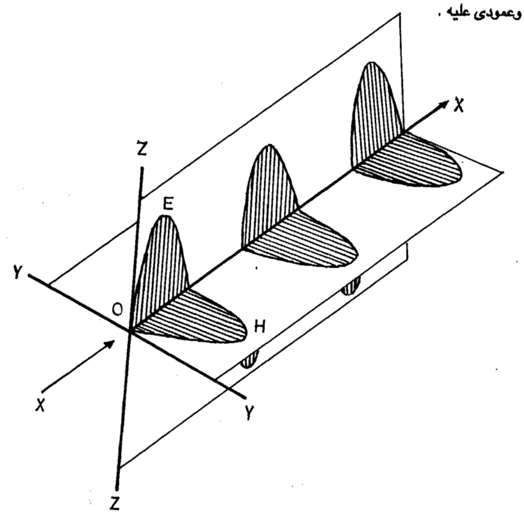
انعكاس وانكسار أشعة الضوء :

تحدد قوانين بسيطة اتجاه الأشعة الضوئية المنعكسة والمنكسرة ، والدراسة الكاملة لهاتين الظاهرتين تتطلب تناول سعة وطور هذه الأشعة ، ولتحقيق هذا الهدف يلزم أن نبدأ بتمثيل الضوء المستقطب فى المستوى الذى تتحدد فيه ذبذباته المتوازية ، والسبب فى ذلك أن الشدة الضوئية المنعكسة والمنكسرة عند السطح الفاصل بين وسطين عازلين تتوقف على مستوى استقطاب ذبذبات قطار الموجات الساقطة . فللاتجاهين الأساسيين أو الرئيسيين لذبذبات الضوء وهما الذبذبات الموازية لمستوى السقوط والمتعامدة على هذا المستوى ، يوجد - لكل منهما - تعبير رياضى ، يربط بين الشدة الضوئية وزاويتى السقوط والانكسار ، وهو تعبير مغاير لاتجاه الذبذبات الآخر .

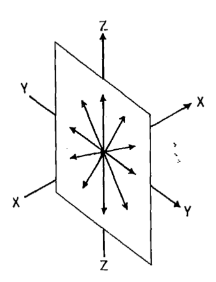
دعنا نتناول تمثيل أبسط أنواع الموجات الكهرومغناطيسية التى تكون فيها جبهة الموجة مستوية وعند أية نقطة يمر بها قطار الموجات تتذبذب السعة الكهربية والسعة المغناطيسية

فى اتجاه خطوط مستقيمة متعامدة وعموديا على اتجاه مسار الضوء . يبين شكل (٢/١) قطار من الموجات يسير قدما فى اتجاه محور X ، وتوجد موجات تتبع المنحنى الجيبى فى المستويين (Z,X), (Y,X) ، وتسمى هذه الموجات بالموجات المستقطبة فى مستوى ، ويعنى هذا أن قمة المتجه E أو H تتذبذب فى الاتجاه الموضح فى الشكل .

والشكل رقم (٣/١) يمثل حزمة من الأشعة الضوئية العادية ، أى غير المستقطبة ، حيث يتذبذب المتجه الكهربى E فى جميع الاتجاهات بشكل متماثل حول اتجاه انتشار الضوء وعمودى عليه .



شكل رقم (٢/١) : قطار من الموجات الضوئية المستقطبة فى مستوى وتسير قدما فى اتجاه المحور



شكل رقم (٣/١) : حزمة من الأشعة الضوئية غير المستقطبة

دعنا نتناول ظاهرة انعكاس وانكسار قطار من الموجات الكهرومغناطيسية عند السطح الفاصل بين وسطين عازلين معامل انكسارهما n', n ، حيث n' > n وكما هو موضح فى الشكل رقم (٢/١) يمثل الموجة شعاع مفرد ، ويقع السطح الفاصل فى المستوى Y - Z ، ومركز الإحداثيات O هو نقطة السقوط ، والعمودى على هذا السطح عند نقطة السقوط هو محور X ، وتقع الأشعة الساقطة والمنعكسة والمنكسرة جميعها في مستوى واحد هو مستوى السقوط وهو المستوى X - Y .

ولكى نحصل على التعبير الرياضى الذى يعطى الشدة الضوئية المنعكسة والشدة الضوئية المنكسرة كنسبة من الشدة الضوئية الساقطة عند السطح الفاصل ، يكفى أن نتناول ونحلل حالتين فقط : الحالة الأولى : عندما يكون الشعاع الساقط مستقطبا فى مستوى السقوط ، أى يكون متجهه الكهربى يتذبذب موازيا لهذا المستوى ، والحالة الثانية : عندما يكون مستوى الاستقطاب عموديا على مستوى السقوط .

وقد تمكن العالم الفرنسى « فرنل Fresnel » من اشتقاق المعادلات التى تعطى نسبة سعة الموجة المنعكسة إلى سعة الموجة الساقطة للحالتين السابق ذكرهما أى عندما يكون الشعاع الساقط مستقطبا في مستوى السقوط وكذلك فى المستوى العمودى عليه بدلالة زاويتى السقوط والانكسار .

وكذلك النسبة بين سعة الموجة المنكسرة إلى سعة الموجة الساقطة فى الحالتين .

ونظرا لأننا لم نتناول حالة سقوط الأشعة غير العمودية فى أبواب هذا الكتاب ، فقد اكتفينا بتناول الانعكاسية عند السقوط العمودى فقط ، وفيه يكون التعبير الرياضى للشدة الضوئية المنعكسة هو نفسه فى حالتى الأشعة المستقطبة فى مستوى موازٍ لمستوى السقوط وعموديا عليه .

فالانعكاسية R عند السقوط العمودى تعطيها العلاقة الآتية بعد وضع n = 1 ، n' = n ، وذلك إذا كان الوسط المحيط بالسطح هو الهواء .

$$R = \frac{E_r^2}{E_\circ^2} = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$$

حيث $E_\circ, E_r$ تمثلات سعة الموجة المنعكسة والساقطة على الترتيب .

هذه العلاقة الهامة أمكن اشتقاقها من معادلات فرنل التى تعبر عن الحالة العامة ، وهى السقوط المائل عندما تكون زاوية السقوط تساوى صفرا ، فانعكاسية سطح مفرد نظيف من عازل مثل الزجاج حيث n = 1.50 بالتعويض فى العلاقة السابقة تعطى R = 4% .

الانعكاس عند سطح معدنى :

تظل معادلة Fresnel صحيحة فى حالة السقوط العمودى على سطح معدنى إذا ماأخذ معامل الانكسار المركب $\tilde{n} = n\,(1 - ik)$ مكان معامل انكسار العازل n فى المعادلة ، فالنسبة بين سعة الشعاع المنعكس إلى الشعاع الساقط تعطيها المعادلة :

النسبة هى $\frac{n-1}{n+1}$.

$$\frac{E_r}{E_\circ} = \frac{E_r\, e^{i\theta}}{E_\circ} = \frac{n\,(1-ik) - 1}{n\,(1-ik) + 1} = \frac{n - 1 - ink}{n + 1 - ink}$$

حيث θ هى زاوية تغير الطور عند الانعكاس (هواء / سطح معدنى) .

وبضرب طرفى المعادلة بالمرافق نحصل على :

$$\frac{\tilde{E}_T}{E_\circ} = \frac{(n-1) - ink}{(n+1) - ink} \times \frac{(n+1) + ink}{(n+1) + ink}$$

$$= \frac{(n^2-1) - ink\,(n+1) + ink\,(n-1) + n^2k^2}{(n+1)^2 + n^2k^2}$$

$$= \frac{(n^2-1) + n^2k^2}{(n+1)^2 + n^2k^2} - \frac{2\,ink}{(n+1)^2 + n^2k^2}$$

$$= \sqrt{A^2 + B^2}\; e^{i\theta} = \sqrt{A^2 + B^2}\; e^{i\tan^{-1} B/A}$$

وتكون الانعكاسية $R = A^2 + B^2$

$$= \frac{(n-1)^2 + n^2k^2}{(n+1)^2 + n^2k^2}$$

$$\tan\theta = \frac{B}{A} = \frac{2\,nk}{1-n^2 - n^2k^2}$$

هذه المعادلة تعطى تغيير الطور عند الانعكاس (هواء / سطح معدنى) عند السقوط العمودى ، فإذا أخذنا فى الاعتبار طور الأشعة عند الانعكاس ، فإنه يتطلب تعديل شرط الحصول على هدب التداخل المضيئة عند النفاذ وهدب التداخل المعتمة عند الانعكاس .

١/٤- حيود الأشعة الضوئية : Diffraction of Light

عندما يمر شعاع ضوئى خلال فتحة ضيقة ، فإنه دائما ينتشر إلي حد ماخارج حدود المنطقة المعرضة للضوء ، وبعبارة أخرى نجد أن الضوء ينتشر فى منطقة الظل الهندسى ، وتسمى ظاهرة انحناء الضوء عند الحواف الحادة وعدم التزامه بالانتشار فى خطوط مستقيمة عند مروره بهذه الحواف بظاهرة حيود الأشعة الضوئية .

وينقسم حيود الأشعة الضوئية إلى نوعين :

أ- حيود فرانهوفر : Fraunhofer diffraction وفيه يكون المصدر الضوئى والحائل الذى يتكون عليه نموذج الحيود على مسافات بعيدة من الفتحة المسببة

لهذا الحيود ، فتصل حزمة من الأشعة المتوازية منبعثة من المصدر لإضاءة الفتحة وتجمع الأشعة النافذة والحائدة فى المستوى البؤرى لعدسة .

ب- حيود فرنل Fresnel diffraction : وفيه يكون المصدر الضوئى أو الحائل أو كلاهما على مسافة محددة من الفتحة المسببة للحيود .

نموذج حيود فرانهوفر باستخدام فتحة مستطيلة :

Fraunhofer diffraction pattern using a rectangular slit :

يبين الشكل رقم (٤/١) النظام البصرى المستخدم للحصول على حيود فرانهوفر باستخدام فتحة مستطيلة . دعنا نحصل على محصلة الموجات التى تمثلها المتجهات الآتية :

$$a_1 e^{i\phi_1}, a_2 e^{i\phi_2}, a_3 e^{i\phi_3}, a_4 e^{i\phi_4} .....$$

للوصول الى هذا الهدف نرسم متجها طوله a_1 يصنع زاوية ϕ_1 مع ox كما فى الشكل رقم (٥/١) ليمثل الموجة الأولى ، ونستمر فى رسم متجهات تمثل بقية الموجات فيكون طول الخط الذى نستكمل له الشكل المضلع polygon الناتج ممثلا لقيمة سعة المحصلة ، وتمثل الزاوية ϕ المحصورة بين المحصلة واتجاه ox زاوية الطور .

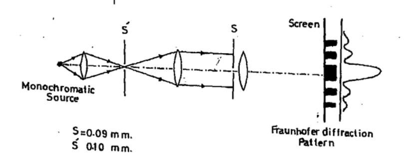
وفى حالة جمع مجموعة من الموجات على هيئة سلسلة فيها فرق الطور بين كل موجتين متتاليتين صغير جدا ولكنه يتغير باستمرار من موجة إلى أخرى ، فإنه ينتج منحنى بدلا من الشكل المضلع . ويمثل عنصر الطول عند أى نقطة على هذا المنحنى سعة الموجة المشاركة ، بينما تمثل الزاوية المحصورة بين المماس لهذا المنحنى عند هذه النقطة مع الخط ox طور هذه الموجة .

وعندما تكون مجموعة الموجات ذات سعات متساوية وعددها كبير جدا وفرق الطور بينها صغير جدا وثابت ، نصل إلى الحالة الخاصة الذى يتحول فيها الشكل المضلع إلى جزء من محيط دائرة (شكل رقم ٦/١) . وإذا كانت سعة الموجة هى a وعدد الموجات يساوى n فإن :

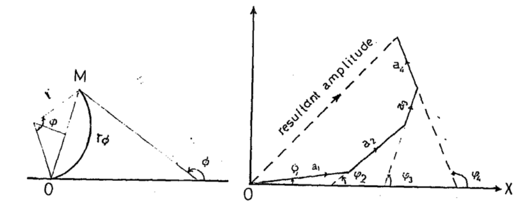
$$\text{Amplitude} = 2\, r \sin \frac{\phi}{2} = OM$$

$$\text{arc } OM = r\phi = na = A$$

$$r = na/\phi$$



شكل رقم (٤/١) النظام البصرى المستخدم للحصول على حيود فرانهوفر باستخدام فتحة مستطيلة



شكل رقم (٥/١) تمثيل الموجات بالشكل المضلع .

شكل رقم (٦/١) الحالة الخاصة عندما تكون مجموعة الموجات لها نفس السعة وعددها كبير جدا وفرق الطور صغير جدا وثابت

وتعطى المعادلة الآتية محصلة السعة :

$$\text{The amplitude of resultant} = OM = 2\,r \sin \phi/2 = \frac{na \sin \frac{\phi}{2}}{\frac{\phi}{2}}$$

ويتضح من الشكل رقم (٧/١) أن فرق المسار يتغير باستمرار من صفر إلى $d \sin \theta$ ،

وبذلك يتغير فرق الطور من صفر إلى $\frac{2\pi}{\lambda}\ d \sin \theta$

$$\therefore \text{The amplitude of resultant} = \frac{A \sin \frac{\pi}{\lambda}\ d \sin \theta}{\frac{\pi}{\lambda}\ d \sin \theta}$$

$$\text{The intensity } I = A^2\ \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2}\quad , \text{where } \alpha = \frac{\pi}{\lambda}\ d \sin \theta$$

1. When $\theta = 0 \therefore \alpha = 0$

$$\lim_{\alpha \to 0} \frac{\sin \alpha}{\alpha} = 1$$

$$\therefore {}_{\alpha \to 0}I = A^2 = I_c$$

2. When $\alpha = m\pi$, where $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, ...$

$$\therefore \quad I = \text{zero}$$

3. When $\alpha = \frac{3\pi}{2}$

$$I = A^2 \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha^2} = \frac{4}{9\pi^2} A^2$$

$$\therefore \quad I = \frac{1}{22.2} A^2$$

4. When $\alpha = 5\,\pi/2$

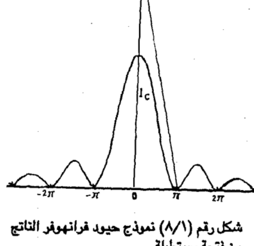
$$I = (4/25\,\pi^2)\,A^2 = \frac{1}{61}\,A2$$

5. When $\alpha = \pi/2$, the intensity $I = I_D$

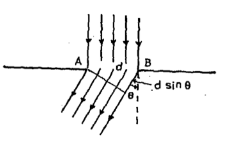
$$I_D = \frac{4}{\pi^2}\,A^2 = 0.405\,A^2$$

$$I_D = 0.405\,I_c$$

ويبين الشكل رقم (٨/١) نموذج حيود فرانهوفر الناتج من فتحة مستطيلة .

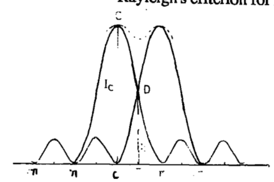


شكل رقم (٨/١) نموذج حيود فرانهوفر الناتج من فتحة مستطيلة



شكل رقم (٧/١) تمثيل فرق المسار فى حالة فتحة مستطيلة مفردة .

وعندما تقع النهاية العظمى لنموذج حيود جسم ما علي أول نهاية صغرى لنموذج حيود جسم آخر كما في الشكل رقم (٩/١) ، تكون هذه هي الحالة التي تحدد أقل مسافة بين جسمين متجاورين يمكن الحصول على صورتين منفصلتين لهما . هذه هي حدود قدرة التحليل Just resolution وهي أسس معيار رالي للقدرة على التحليل والحصول على صور منفصلة Rayleigh's criterion for resolution



شكل رقم (٩/١) : حالة حدود قدرة التحليل (أسس معيار رالي للقدرة على التحليل والحصول على صور منفصلة) .

١/٥- الامتصاص والتشتت : Absorption and Scattering

عندما تنتقل الموجات الكهرومغناطيسية خلال أي وسط مادي ، فإن شدتها تضمحل بالامتصاص والتشتت ، وتتغير شدة الموجات حسب المعادلة الآتية :

$$I = I_o e^{-\mu r}$$

حيث I_o هي شدة الموجات الابتدائية ، r هي المسافة التي قطعتها هذه الموجات خلال هذا الوسط، μ هو معامل الاضمحلال attenuation coefficient بوحدات مقلوب المسافة .

وتوضح هذه المعادلة أن شدة الموجات تقل أسيا مع المسافة r التي قطعها الشعاع داخل الوسط . يتغير معامل الاضمحلال بتغير الطول الموجي λ ، ويمكن أن ينقسم إلى ثلاث مكونات أساسية :

$$\mu = \sigma_{\text{absorption}} + \sigma_{\text{Rayleigh scattering}} + \sigma_{\text{Mie scattering}}$$

ويتناسب تشتت رالي مع λ^{-4} ويحدث نتيجة وجود الجسيمات ذات الأبعاد التي تساوي الطول الموجي للضوء تقريبا . أما الجسيمات ذات الأبعاد الأكبر فإنها تسبب تشتت

ماى Mie Scattering ، الذى يتغير بتغير حجم الجسيمات وشكلها ، ومعامل انكسار مادتها وزاوية التشتت ، وطول موجة الضوء .

تشتت الضوء Scattering of Light :

أوضح العالم « فرنل » أن غياب الأشعة العمودية على مسار حزمة أشعة الضوء التى تنتشر فى الفراغ يحدث نتيجة التداخل الضوئى الهدام للمويجات ، التى يمكن اعتبار أنها تنبعث من جميع النقط فى الحيز الذى تنتشر فيه أو يقطعه شعاع الضوء . تتحقق نفس الظروف فى وسط تام الشفافية وتام التجانس ، لكن وجود مناطق غير متصلة فى وسط لايتفق مع تلك الظروف المطلوبة لحدوث التداخل الضوئى الهدام ، يحدث تشتت عرضى للضوء وتنبعث أشعة عرضية نتيجته .

وفى سنة (١٩٦٦) وجد "Kao & Hockman" أن إضمحلال الضوء بواسطة الزجاج المستخدم فى تصنيع الألياف البصرية ليس خاصية أساسية للمادة ، ولكنه يحدث من الشوائب الموجودة فى هذه المادة وخصوصا أيونات المعادن . ويتحدد الفقد الذاتى أساسا من تشتت رالى ومقداره صغير جدا ، ويؤدى نقص محتوى الشوائب إلى معدل فقد أقل ، وقد لوحظ أيضا أن اضمحلال قدرة ٢٠ ديسبل / كم dB/Km (decibel per kilometer) للألياف البصرية الزجاجية المستخدمة فى التراسل الضوئى يعتبر الحد المقبول عمليا لاستخدامها فى التراسل لمسافات طويلة .

وفى عام (١٩٧٠) نجحت شركة Corning Glass الأمريكية فى تصنيع ألياف بصرية أحادية المنوال Single mode ذات فقد مقداره أقل من ٢٠ ديسبل / كم.

وفى سنة (١٩٧٢) أعلن عن الوصول إلى فقد اقل ومقداره ٤ ديسبل / كم ، وذلك لألياف بصرية عديدة المنوال ذات لب مصنوع من السيليكون .

وفى عام (١٩٧٦) نجح باحثون يابانيون فى تصنيع ألياف بصرية ذات محتوى هيدروكسيل (OH) قليل للغاية وتوصلوا إلى اقل فقد ممكن ومقداره ٠,٤٧ ± ٠,٠١ ديسبل / كم ، وهى قيمة قريبة جدا من قيمة الفقد الذاتى للمادة (تشتت رالي) . وباستخدام أطوال موجية أطول أمكن خفض مقدار الفقد إلى ٠,٢ ديسبل / كم سجل لألياف أحادية المنوال عند λ = ١,٥٥ ميكرون .

تشتت الضوء بالجسيمات الصغيرة : Scattering of light by small particles

يتشتت الضوء كنتيجة لوجود جسيمات صغيرة عالقة فى وسط شفاف أو بجزيئات المادة ، وقد بحثت هذه الظاهرة قبل اكتشاف التشتت (بالمواد الصلبة النقية الشفافة وكذلك السوائل والغازات) بوقت طويل .

فإذا سمح لشعاع من الضوء يمر خلال وسط شفاف يحتوى على جسيمات صغيرة عالقة ، معامل انكسار مادتها يختلف عن معامل انكسار الوسط المحيط بها ، فإن الضوء يتشتت فى جميع الاتجاهات ، وإذا كانت هذه الجسيمات صغيرة جدا ، فإن الضوء المتشتت يكون جميعه مستقطبا استوائيا ، بحيث يكون المتجه الكهربى عموديا على اتجاه الضوء الساقط واتجاه الملاحظة ، وإذا كان الشعاع الساقط مستقطبا استوائيا ، فإن الضوء لايتشتت فى الاتجاه الموازى لهذا المتجه الكهربى ، وتزيد شدة الضوء المشتت بسرعة بزيادة قطر الجسيمات ، وتتناسب طرديا مع مربع حجمها .

والمعادلة الآتية تعطى صيغة رالى لشدة الضوء I المشتت فى الاتجاه الذى يصنع زاوية β مع الشعاع الساقط غير المستقطب .

$$I = I_o \frac{(D'-D)^2}{D^2} (1 + \cos^2 \beta) \frac{m\pi v^2}{\lambda^4 r^2}$$

حيث I_o هى شدة الضوء الساقط ، D, D' هما الكثافة الضوئية Optical densities للجسيمات والوسط المغمور فيه ، m هى عدد الجسيمات ، λ هى طول موجة الضوء ، v هى حجم الجسيم المشتت للأشعة الضوئية ، r هى المسافة من هذا الجسيم الى نقطة القياس .

وتوضح هذه المعادلة أن شدة الضوء فى اتجاه السقوط هى ضعف الشدة فى الاتجاه العمودى عليه .

تقلبات أو تغيرات الكثافة وتشتت أشعة الضوء :

يقل التداخل الهدام للأشعة المترابطة المشتتة فى الاتجاهات العرضية بواسطة جزيئات سائل بقدر ملحوظ فى وجود تقلبات فى الكثافة ، وأثبتت الحركة البراونية Brownian للجسيمات الصغيرة فى السائل أن هذه التغيرات فى الضغط موجودة ، وكنتيجة لها توجد تغيرات الكثافة التى تتناسب طرديا مع انضغاطية السائل Compressibility .

منع استقطاب الضوء المتشتت : Depolarization of scatterd light

فى حالة إضاءة الغازات والسوائل بضوء مستقطب ، فإنه عادة مايلاحظ أن الضوء أصبح مستقطبا جزئيا ، أى أنه حدث منع جزئى للاستقطاب depolarization ، يحدث ذلك عندما يكون الجزئ غير متجانس بالنسبة للاتجاهات الكارتيزية anisotropic ويكون ترتيب الجزيئات فى اتجاهات مختلفة ولاتكون العناصر المسببة للتشتت موازية لذبذبات الضوء .

ويحدث تشتت «ماى» عندما تكون الأطوال الموجية للضوء المستخدم أقل من أقطار الجسيمات العالقة والمسببة للتشتت ، فالدخان والغبار وقطيرات الماء هى المسببات الرئيسية لتشتت « ماى » فى الجو . ويمكن التعبير عن تشتت « ماى » كميا بالمعادلة الوضعية الآتية (Pratt, 1969) التى تعطي معامل التشتت :

$$\sigma_{\text{Mie scattering}} = (3.91/v)\ (\lambda_c/0.55)^{-0.585 v^{1/3}}$$

where σ_{MS} is per kilometer

v is the visual range in kilometers

λ_c is the wavelength in microns.

٦/١–التفرق الضوئى : Dispersion

كان « كوشى Cauchy » أول من حاول وضع نظرية لتفسير زيادة انكسار شعاع ضوئى عندما يقل طول موجة الضوء المستخدم وذلك عام (١٨٣٦) . فقد استنتج صيغة للتفرق الضوئى والتى تعرف باسمه وفيها يتغير معامل انكسار المادة n_λ مع الطول الموجى للضوء تبعا للعلاقة الآتية :

$$n_\lambda = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$$

ويتم حساب ثوابت هذه المعادلة C, B, A بتعيين قيم n_λ باستخدام ثلاثة أطوال موجية معروفة وبعيدة عن بعضها ، وقد وجد أن هذه المعادلة تمثل تفرق الضوء فى معظم المواد الشفافة .

وقد قدم اكتشاف التفرق الشاذ أو غير المألوف anomalous dispersion والعلاقة بين الإمتصاص والتفرق معلومات مفيده ، فقد وجد أن معامل انكسار مادة تعانى امتصاص انتقائيا selective absorption يزيد بسرعة عندما تقترب شرائط الامتصاص absorption bands من منطقة الأشعة فوق البنفسجية . ولذلك لايوجد اختلاف أساسى بين التفرق المألوف والتفرق غير المألوف ، حيث يعتبر الأول حالة خاصة من الثانى . وفى حالة التفرق المألوف فإن الدراسة والملاحظة تتم فى مدى ضيق من الأطوال الموجية لايسمح بظهور هذا الشذوذ .

وقد استنتج "Sellmeier" معادلة تمثل التفرق الضوئى ، وذلك فى حالة الأطوال الموجية التى تعتبر المادة بالنسبة لها شفافة تماما أى على جانبى شريط الامتصاص .

$$n_{\lambda}^{2} = 1 + \frac{D\lambda^{2}}{\lambda^{2} - \lambda^{2}m}$$

حيث n_{λ} هى معامل انكسار المادة للطول الموجى ، λ ، λ_m هى الطول الموجى الذى يحدده طيف امتصاص ذرة العنصر ، D هى مقدار ثابت يتغير مع نوعية بخار المادة .

التفرق الضوئى للمادة : Material dispersion

إن معامل انكسار مادة – كما سبق أن ذكرنا – هو دالة فى الطول الموجى ، وتزيد سرعة الضوء فى الوسط كلما نقص معامل انكسار مادة الوسط ، وتكون النتيجة أن الضوء المتكون من عدة أطوال موجية مختلفة ينتقل بسرعات مختلفة خلال نفس الشعيرة البصرية المستخدمة فى التراسل الضوئى . والأطوال الموجية الأطول لها معامل انكسار أقل وسرعة انتقال أعلى ، ويسمى هذا التأثير بالتفرق الضوئى الذى تسببه المواد المستخدمة فى تصنيع الألياف البصرية للضوء ويظهر كتفرق للأطوال الموجية Material or wavelength dispersion.

ويجب أن نفرق بينه وبين التفرق المنوالى model dispersion والذى ينتج من وجود مناويل أى مسارات مختلفة للأشعة داخل الشعيرة .

ويقل التفرق الضوئى الذى تسببه المواد إذا مااستخدمت مصادر ضوئية ينبعث منها شرائط ضيقة من الأطوال الموجية أو خطوط طيفية حادة ضئيلة العرض ، وهذه هى حالة

ليزر الحقن injection laser والتى تصدر شرائط ضيقة جدا ذات عرض حوالى نانومتر واحد عندما تقارن مع الضوء الصادر من ثنائى باعث الضوء light emitting diodes والتى تصدر شرائط عرضها ٣٠-٤٠ نانومتر .

ويكون التفرق الضوئى للمواد ملحوظا جدا عمليا فى حالة الألياف البصرية وحيدة المنوال ، والتى يختفى فيها التفرق المنوالى أى الناتج من وجود أكثر من منوال . هذا ولقد وجد أن التفرق الضوئى الذى تسببه المواد يختفى عند طول موجى محدد ، فمثلا فى حالة الألياف البصرية المصنعة من السيليكا المنصهرة Fused silica يختفى التفرق الضوئى عند λ = ١,٢٧ ميكرون ، وبزياده الطول الموجى عن هذه القيمة يظهر التفرق الضوئى مرة أخرى ولكن بإشارة مختلفة .

ويمكن أن تصنع ألياف من السيليكا المنصهرة ذات تفرق ضوئى يساوى صفرا عند λ = ١,٣٢ ، λ = ١,٥٥ ميكرون ، وذلك يسمح باستخدام مصادر ضوئية ذات شرائط عرضية high band width وتعنى قيمة «التفرق الضوئى = الصفر» أنه يمكن استخدام الضوء غير المترابط الناتج من ثنائى باعث للضوء الذى يصدر عنه ضوء غير مترابط عند استخدام وصلات من الألياف .

١/٧- المصادر الضوئية : Light sources

مصادر الضوء هى أجهزة ينبعث منها خطوط طيفية ، وتستخدم لإضاءة مقاييس التداخل الضوئى بأشعة أحادية الطول الموجى . وينبغى أن تكون هذه الخطوط الطيفية حادة ضئيلة العرض ، ولها شدة مناسبة وخالية من التركيب الطيفى الدقيق ، أى لاتوجد فى مناطق مزدحمة بخطوط الطيف الدقيقة التى تحيط بخط الطيف ، وأن يقع طولها الموجى فى المنطقة الطيفية المرئية أو فى منطقة الأشعة تحت الحمراء القريبة أو فى منطقة الأشعة فوق البنفسجية .

والمصادر الضوئية المستخدمة بكثرة فى التداخل الضوئى هى :

مصابيح الزئبق ذات الضغط العالى وذات الضغط المنخفض عند الطول الموجى ٥٤٦٠,٧٥ انجستروم ، مصباح الثاليوم عند ٥٣٥٠ انجستروم ، مصباح الزئبق - كادميوم

، ونظير الزئبق Hg^{198}, Kr^{86}, Cd^{114} وليزر الهيليوم نيون عند ٦٣٢٨ انجستروم ، وليزر الياقوت عند ٦٩٣٤ انجستروم .

وتصدر مصابيح الزئبق - سواء عند الضغط العالى أو المنخفض - الخطوط الطيفية الآتية فى المنطقة المرئية ٥٧٩٠ ، ٥٧٧٠ أنجستروم (أصفر) ، ٥٤٦٠,٧٥ انجستروم (أخضر) ، ٤٣٥٨,٥ (أزرق) ، ٤٠٧٨ ، ٤٠٤٧ أنجستروم (بنفسجى) . وللحصول على ضوء أحادى طول الموجة يمكن استخدام مرشح ضوئى يقوم على التداخل الضوئى interference filter مع مصباح الزئبق ، وتتميز هذه المرشحات بعرضها النصفى الضيق ، وهو عرض النافذه الطيفية عند منتصف شدتها العظمى عند المركز λ_0 ، ويكون عرض هذه النافذة فى حدود ١٠ نانومتر ، وبالتالى فإن هذا المرشح يسمح بمرور الأطوال الموجية $\lambda \pm$ ٥٠ انجستروم . وكلما قل العرض النصفى للخط الطيفى كلما قرب الشعاع النافذ من أن يكون أحادى طول الموجة ولكن يحدث ذلك على حساب شدة الضوء النافذ .

ومرشح التداخل الضوئى الأخضر الذى تتركز نافذته عند $\lambda =$ ٥٤٦٠,٧٥ أنجستروم وعرضه النصفى ١٠٠ أنجستروم ، يسمح فقط بمرور ضوء الزئبق الأخضر أحادى طول الموجة ، ويحجب بقية الخطوط الطيفية لمصباح الزئبق ، حيث إن الطول الموجى عند ٥٧٧٠ أنجستروم يبعد عن الخط الأخضر بمقدار ٣١٠ أنجستروم .

ولكل مصدر طيفى مرشحه الخاص الذى يسمح بمرور الطول الموجى المناسب ، ولايحتاج مصباح الثاليوم إلى مرشح فى المنطقة الطيفية المرئية ، حيث إنه لاتوجد أية خطوط طيفية ذات شدة كافية فى هذه المنطقة غير خط الطيف عند ٥٣٥٠ أنجستروم ، ويصدر مصباح الزئبق خطين طيفيين فى منطقة الأشعة فوق البنفسجية عند الطول الموجى ٣٦٥٠ ، ٢٦٥٠ أنجستروم ، وهما خطان مناسبان لدراسات التداخل الضوئى فى هذه المنطقة الطيفية . وفى هذه الحالة يستخدم مصباح زئبق ذو نافذة من الكوارتز ، حيث إن الزجاج يمتص الأشعة فوق البنفسجية ، ويمرر فقط الأطوال الموجية فى منطقة الطيف المرئى .

وفى أنظمة التداخل الضوئى التى تستخدم الضوء الأبيض - كما فى حالة هدب التداخل الضوئى ، متساوية الرتبة اللونية - فإنه يستخدم مصدرا ضوئيا تكون فتيلته على

شكل كرة صغيرة متمركزة فى مركزه pointolite source ، وكثيرا ماتستخدم فتائل على هيئة خطوط مستقيمة فى التجارب التى تحتوى على فتحات طولية ذات شق مستطيل . وتستخدم مصابيح الأيدروجين ذات نوافذ من الكوارتز كمصادر طيفية فى منطقة الأشعة فوق البنفسجية .

وينبعث من المصادر العادية ضوء مترابط فوتوناته جزئيا ، والفرق بينهما هو فى كمية هذا الترابط ، وتظهر موجات الضوء كمنحنى جيبى نقى فقط فى منطقة محدودة من الفراغ أو فى زمن محدود أيضا .

وتحتوى المصادر الضوئية الليزرية على مميزات غير موجودة فى المصادر العادية ، فمثلا فى حالة أشعة الليزر تصدر كل الذرات أشعة طورها ثابت لمدة $\frac{١}{١٠٠}$ أو $\frac{١}{١٠}$ ثانية ، وفى بعض الحالات لفترات أطول .

وتنقسم المصادر الضوئية التى ينبعث منها ضوء فى مناطق الطيف المنظور والأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية إلى ثلاث مجموعات :

أ- القوس الكهربى ، الشرارة ، أنابيب التفريغ الكهربى الخالية من الأقطاب electrodeless .

ب- المصادر الطيفية التى تستخدم لدراسة التركيب الدقيق ، وهى مصباح الكاثود الأجوف hollow cathode lamps ، ومصباح حزم الأشعة الذرية atomic beam ، ومصابيح النظائر isotope lamps .

جـ- الليزر المستمر والنبضى .

وأحد الفروق الرئيسية بين الأشعة المنبعثة من المجموعات الثلاث هو درجة نقائها الطيفى degree of monochromaticiy ، وتقاس هذه الخاصية بالعرض النصفى لغلاف الأشعة المنبعثة ، وتتكون كل الخطوط الطيفية من أغلفة لمدى الترددات التى تتمركز حول منتصف الخط الطيفى ذى طول الموجة الذى يصف هذا الخط . وكلما قل عرض الخط الطيفى كلما قرب من خط طيفى أحادى طول الموجة monochromatic . وسنشرح هذه الخاصية بالتفصيل فى الفصل الثانى ، ولكن من المفيد أن نذكر هنا أن العرض النصفى للخطوط الطيفية الصادرة من الثلاث مجموعات السابق ذكرها مرتبة ترتيبا تنازليا .

والعرض النصفى لخط الطيف هو محصلة مجموعة من العوامل وهى :

١- الاتساع الطبيعى	Natural broadening
٢- الاتساع الناتج من التصادم	Collision broadening
٣- الاتساع الناتج من ظاهرة دوبلر	Doppler broadening
٤- اتساع شتارك	Stark broadening
٥- الاتساع الذاتى	Self broadening

References

Hecht E and Zajac A 1976, Optics (Reading : Addison - Wesley Publishing Company.

Meyer - Arendt J R 1972, Introduction to Classical and Modern Optics (New Jersey : Prentice - Hall)

Pratt W K 1969, Laser Communication Systems (New York : John Wiley & Sons) P. 131.

Smith F G and Thomson J H 1988, Optics (Chichester : John Wiley & Sons).

الفصــل الثــانى

أشعــة اللـــيزر Lasers

٢/١- مقـدمة :

كلمة ليزر جديدة على اللغة العربية ، وهى الحروف الأولى من جملة باللغة الأنجليزية تعنى تضخيم أو تكبير شدة الضوء بواسطة الانبعاث المستحث ، والجملة هى :

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)

فى عام (١٩٦٠) تمكن العالم الأمريكى « ميمـان Maiman » من صناعة أول ليزر على الإطلاق بواسطة بللورة من الياقوت المطعم بالكروميوم ، حيث انبعثت ومضات من الأشعة الحمراء طولها الموجى ٦٩٤٣ أنجستروم تتميز ببريق شديد فى اتجاه الأشعة ولاتفقد شدتها مع زيادة بعدها عن المصدر إلا ببطء ، شديد .

وحاليا أنواع الليزر من ناحية التكوين هى :

١- الليزر الغازى .

٢- الليزر البللورى .

٣- ليزر أشباه الموصلات .

٤- ليزر السوائل .

كما استحدثت أنواع اخرى .

ومن ناحية طبيعة الانبعاث تنقسم أشعة الليزر إلى نوعين :

١- شعاع مستمر Continuous waves (CW) .

٢- ومضات Pulsed lasers .

وأشعة الليزر قد تكون فى الطيف المنظور أو تحت الحمراء بمناطقها الثلاث : القريبة والمتوسطة والبعيدة ، أو فى منطقة الأشعة فوق البنفسجية . هذا وقد أمكن الحصول على

أشعة الليزر فى منطقة الموجات الميكرومترية ، ويسمى فى هذه الحالة ميزر MASER . وقد تم حديثا الحصول على أشعة ليزر تقع فى منطقة الأشعة السينية ذات أطوال موجية طولها ٢٠,٦ ، ٢٠,٨ ، ٢٠ نانومتر ، وذلك عند استخدام بلازما السيلينيوم كوسط ليزرى . وفيما يلى نورد أهم الخصائص المشتركة لجميع أنواع أشعة الليزر التى تميز هذه الأشعة عن تلك التى تنبعث من المصادر التقليدية :

٢/٢- أهم خصائص شعاع الليزر :

١- النقاء الطيفى :

فشعاع الليزر حزمة ضوئية غاية فى النقاء من ناحية الطول الموجى أو التردد ، فأشعة الضوء المنبعثة من المصادر الضوئية التقليدية – كمصباح الصوديوم أو الزئبق – نصفها بأنها وحيدة الطول الموجى إذا مانفذت خلال مرشح ضوئى مناسب . فمصباح الصوديوم ينبعث منه طيف الصوديوم ، وهو طيف خطى لأنه طيف ذرى ويحتوى خطوط طيف ، أكثرها شدة ضوئية فى الطيف المنظور هما خطان فى الأصفر طولهما الموجى ٥٨٩٠ ، ٥٨٩٦ أنجستروم .

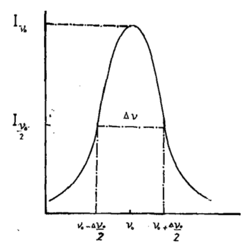
وفى حالة مصباح الزئبق ، يحتوى طيف ذره الزئبق المنبعث من المصباح على خطين فى الأصفر أطوالهما الموجية هى ٥٧٩٠ ، ٥٧٧٠ أنجستروم ، وخط فى الأخضر عند ٥٤٦١ أنجستروم وخط فى الأزرق عند ٤٣٥٨,٥ أنجستروم ، وخطين فى البنفسجى عند ٤٠٧٨ ، ٤٠٤٧ أنجستروم . وباستخدام مرشح ضوئى نحصل على ضوء أحادى الطول الموجى عند ٥٤٦١ أنجستروم ولونه أخضر . هذه الأشعة بالرغم من وصفها هنا بأنها وحيدة الطول الموجى ، إلا أنها فى الواقع تحتوى على أطوال موجية حول الطول الموجى الأساسى الذى يعطى أعلى شدة ضوئية .

وتقل الشدة الضوئية للأطوال الموجية الأخرى كلما ابتعدت عن الطول الموجى الأساسى لخط الطيف ، ومعنى هذا أن خط الطيف لأى عنصر هو غلاف الشدة الضوئية لما يحتويه من أطوال موجية أو ترددات ، فنحن نعلم أن الطول الموجى × التردد = سرعة الضوء $c = \lambda\upsilon$ والصيغة الرياضية لهذا الغلاف وهو مانراه لخط طيف هى فى صورتها المبسطة ، بين الشدة الضوئية والتردد هى صيغة جاوس أو صيغة لورنتس ، وسنكتفى هنا بصيغة جاوس وهى $I_\upsilon = I_{\upsilon_0}\, e^{-\alpha(\upsilon - \upsilon_0)^2}$.

حيث υ_0 هى التردد عند منتصف خط الطيف ، I_υ هى الشدة الضوئية عند تردد υ ، α بارامتر يميز بروفيل خط الطيف .

وعندما نمثل هذه المعادلة بيانيا نحصل على الشكل رقم (١/٢) ، وفيه يظهر بوضوح الاتساع الطيفى لخط الطيف ، ويسمى الاتساع الطيفى عند $I_\upsilon = I_{\upsilon_0} /2$ بالاتساع الطيفى النصفى لخط الطيف ، وتتوقف قيمته على البارمتر α .

وواضح أنه كلما قل الاتساع الطيفى كلما زادت حدة خط الطيف ، قرب من خط الطيف المثالى الذى يحوى طولا موجيا واحدا وهو بطبيعة الحال لايوجد فى الطبيعة إذ لابد لكي يرى أو يسجل أن يكون له اتساع طيفى ، وفى حالة أشعة الليزر يكون الاتساع الطيفى ضئيلا جدا بمقارنته بالمصادر التقليدية ، ولهذا فإننا نصفه بأنه غاية فى النقاء من ناحية الطول الموجى أو التردد .



شكل رقم (١/٢) : الاتساع الطيفى النصفى لخط الطيف

٢- تركيز الأشعة :

شعاع الليزر حزمة ضوئية مركزة تركيزا شديدا ، أى زاوية انفراجها صغيرة للغاية ، وتسير الاشعة فى خطوط مستقيمة أقرب ماتكون إلى التوازى ، وبهذا لاتخضع شدة استضاءة سطح يعترضها لقانون التربيع العكسى ، اى لاتقل شدة الاستضاءة عكسيًا مع مربع المسافة عن مركز شعاع الليزر . ويعنى هذا أن حزمة أشعة الليزر لاتفقد شدتها إلا ببطء شديد ، فإذا ماارسلت أشعة الليزر فى اتجاه القمر على بعد ٤٠٠ ألف كيلو مترا من سطح الأرض ، وكانت بالشدة الضوئية الكافية ، فإنها تفرش على سطح القمر بقعة مضاءة

لايزيد قطرها عن كيلومتر واحد ، فى حين أنه إذا أرسلنا الضوء العادى ووصل - فرضا - إلى سطح القمر ، فإن قطر البقعة المضاءة تصل إلى ٣٤٧٦ كيلومترا .

ويصاحب عدم انفراج الأشعة بريقا شديدا فى اتجاه الأشعة ، ضارا بالعين إذا ماستقبلته مباشرة وخاصة الأشعة تحت الحمراء ، إذ ينبعث عن الليزر أشعة لها طول موجى واحد - كما ذكرنا - تحدده مناسيب طاقة ذرات العنصر المضيف الذى يحتويه جهاز الليزر والذى تنبعث عنها أشعة الليزر عند إثارتها لتعطى الخصائص الجديدة ويمكن لذرات نفس العنصر أن ينبعث منها أشعة ليزر بطول موجى آخر بتعديلات داخلية فى جهاز الليزر ، فمثلا أحد أمثلة الليزر الغازى هو ليزر هيليوم - نيون ، إذ يحوى خليطا من غازى الهيليوم والنيون بنسبة ٧ : ١ تحت ضغط يتراوح بين ١ ، ١,٥ ملليمتر زئبق ، ونسمى النيون بالضيف ، والهليوم بالمضيف ، والذرة الفعالة هنا هى ذرة النيون ، وتصدر شعاعا مستمرا عند الأطوال الموجية الآتية : ٦٣٢٨ أنجستروم وهو فى المنطقة المرئية من الطيف ولونه أحمر ، ١,١٥٠ ميكرون ، ٣,٣٩ ميكرون وكلاهما فى منطقة الأشعة تحت الحمراء غير المرئية للعين . ولاتنطلق هذه الأطوال الموجية معا إنما كل على حدة ، ولكل منهما متغيرات خاصة داخل الجهاز . وهذه الأطوال الموجية هى أطوال لبعض خطوط طيف النيون .

٣- ترابط وتماسك فوتونات الأشعة :

الخاصية الهامة الأخرى التى تميز أشعة الليزر هى خاصية الترابط أو التماسك بين الفوتونات المكونة للشعاع ، فنحن نعلم أن الأشعة المرئية وغير المرئية تصدر عن إثارة ذرات العناصر ، وتنبعث منها فى شكل كم ضوئى أو فوتون كمية من الطاقة لها طول موجى واحد يحدده منسوبا طاقة الذرة التى انتقلت بينهما ، وملايين هذه الانتقالات التى تحدث فى ملايين الذرات المثارة ينبعث عنها ملايين الفوتونات ، التى تظهر للعين المجردة كأشعة ضوئية متصلة وخطوط طيف . ويلاحظ هنا عدم وجود رابطة بين أى فوتونين من ناحية الفترة التى تنقضى بين بدء انبعاثها ، ولاصلة بين اتجاهيهما . فى حين أن أشعة الليزر فوتوناتها مترابطة ومتماسكة ، فهناك فرق طور ثابت بين أى فوتونين فيها والجميع متحدة الاتجاه . هذا اختلاف أساسى بين أشعة الليزر المترابطة فوتوناتها وأشعة المصادر العادية . ويمكننا تشبيه الأشعة الضوئية العادية بأصوات منطلقة من ملايين المصادر المتماثلة ، لها نفس

التردد ، لكنها لاترتبط بفارق زمنى محدد بين أوقات انطلاقها ، وبهذا تسمع عن بعد وكأنها ضجيج ، فى حين أنه إذا انطلقت هذه الأصوات فى نفس الوقت أو بفارق زمنى ثابت فإنها تصبح حادة شديدة الأثر . هذه هى ظاهرة الترابط أو التماسك فى المصادر .

٣/٢- أساس نظرية الفعل الليزرى :

الأصل فى الأساس النظرى لمولدات الكم أو الليزر يرجع إلى العالم «أينشتين» عام (١٩١٧) الذى قام بدراسة نظرية لحالة وسلوك مجموعة من الذرات فى بناء ذرى تحت تأثير مصدر طاقة خارجى ، وحدد العناصر التى يقوم عليها الاتزان بين الأشعة المؤثرة والإشعاع المنبعث والممتص من الذرات ، وأوضح وجود نوع جديد من الإشعاع بجانب الإشعاع التلقائى الذى يصدر من جميع المصادر الضوئية العادية ، والإشعاع الجديد هو الانبعاث المستحث . وقد تمكن العالم «أينشتين» من اشتقاق القوانين التى تحدد العلاقات بين الانبعاث والإشعاع التلقائى والمستحث والامتصاص .

إن ذرات العناصر فى الطبيعة تكون فى حالة عدم إثارة نسبية أى مايطلق عليها بالحالة الأرضية ، وتتوازن شحنة الألكترونات الدوارة فى مدارات مع شحنة النواة ، وتشغل تلك الألكترونات مدارات خاصة تحددها الطاقة الذاتية للذرة . وإذا ماأثيرت الذرة بمصدر خارجى ، غالبا ماتكون نتيجته تصادم بين هذه الذرة وذرة أخرى أو بينها وبين ألكترون يسير بسرعة عالية ، فقد تقفز ألكترونات إلى مدارات أبعد من النواة ، رافعة الطاقة الكلية للذرة إلى منسوب أعلى . ولما كانت هذه الحادثة عارضة فإن الذرة تميل إلى الرجوع إلى حالتها الأرضية بعد فترة زمنية قصيرة . يتم هذا بأن تفقد الذرة الطاقة المكتسبة بإشعاع فوتون أو كم ضوئى ، يحدد تردد الضوء المنبعث الفرق بين منسوبى طاقة الذرة طبقا لعلاقة « بوهر » :

$$\upsilon = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

حيث E_1, E_2 طاقتى الذرة فى المستويين الأعلى والمنخفض h ، ثابت بلانك .

وتقاس الطاقة بوحدات الألكترون فولت ، وهى وحدة ضئيلة القيمة بالمقارنة بوحدات الطاقة فالسعر هو الطاقة التى يكتسبها جرام واحد من الماء عند رفع درجة حرارته درجة

مئوية واحدة ، يساوى ٣٠ × ١٠^١٨ ألكترون فولت ، فى حين أن منسوب الطاقة الأرضى للهيدروجين هو ١٠ ألكترون فولت فقط ، وتحدث ملايين هذه الانتقالات للذرات وتظهر كضوء منبعث له تردد واحد كما يحدث هذا الخمود التلقائى للذرات بدون تحكم أى بطريقة عشوائية ، والنتيجة هى انبعاث الضوء العادى غير المترابط فوتوناته من جميع مصادر الإضاءة التقليدية كمصباح الصوديوم أو الزئبق أو النيون . وفيما يلى قيم لمتوسط عمر بعض الذرات المثارة لمناسيب معينة من الطاقة .

الجدول رقم (١/٢)

العنصر	الزمن بالثانية
الليثيوم	٦,٥ × ١٠^-٨
الصوديوم	١,٥ × ١٠^-٨
الزنك	١ × ١٠^-٥
الكادميوم	٢ × ١٠^-٦
الزئبق	١,٥ × ١٠^-٧

يتضح من الجدول السابق رقم (١/٢) أنه لكل ذرة عنصر مثارة لمنسوب طاقة معين هناك قيمة لمتوسط عمرها يحدث بعده الخمود التلقائى . ولما كان من الممكن إثارة ذرات نفس العنصر لمناسيب محدده للطاقة ، فإنه لكل منسوب طاقة قيمة لعمر الذرة المثارة له . وإذا انتهزنا الفترة الزمنية التى تكون فيها الذرات مازالت مثارة فإنه يمكن تنشيط أو حث الهبوط إلى منسوب الطاقة الأقل وذلك بشحن الذرة بفوتونات منبعثة من مصدر خارجى يكون له نفس الطاقة التى تشعها الذرة تلقائيا ، وبهذا لايكون الخمود عشوائيا ، إنما خمود مستحث ، وتترك الفوتونات المنبعثة الجهاز كضوء مترابط الفوتونات أى متماسك الكم الضوئى . هذه هى أشعة الليزر .

وقبل البدء فى استنتاج علاقتى « أينشتين » ينبغى الإشارة إلى توزيع ذرات الوسط بين مناسيب الطاقة .

ففى أية مجموعة من الذرات فى اتزان حرارى ، يكون عدد الذرات التى لها منسوب طاقة معين (E_2) أقل من عدد الذرات التى لها منسوب طاقة أقل (E_1) . فإذا رمزنا إلى عدد الذرات فى منسوبى الطاقة ٢ ، ١ بالحرفين (N_2) ، (N_1) فإن N_2 تكون أقل من N_1 إذا كانت E_2 أكبر من E_1 ، أى كلما زاد منسوب الطاقة قل عدد الذرات . يحدد هذه العلاقة قانون اكتشفه العالم الألمانى « بولتزمان » وهو

$$(N_2/N_1) = \bar{e}^{(E_2-E_1)/KT} \qquad (2.1)$$

حيث K ثابت بولتزمان ، T درجة الحرارة المطلقة ، N_2 , N_1 هما عدد الذرات فى وحدة الحجوم عند المنسوبين E_2 , E_1 .

٤/٢ علاقتا أينشتين والتعاكس الإسكانى للذرات :

يتكون الشعاع المنبعث من مجموعة الذرات فى وجود مصدر خارجى للأشعة من جزئين :

الأول : هو الانبعاث التلقائى . وتتناسب شدته مع عدد الذرات التى تهبط من منسوب الطاقة E_2 الى E_1 ، ولايرتبط بشدة المصدر الخارجى أو بطور أشعته .

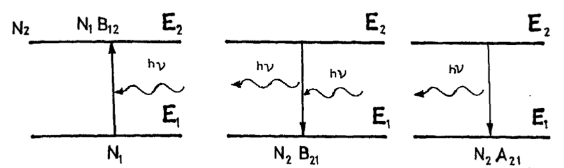
والجزء الثانى : هو الانبعاث المستحث ، وتتناسب شدته مع شدة المصدر الخارجى الذى حثه على الانبعاث ويكون للإنبعاث المستحث نفس طور أشعة المصدر الخارجى . والشكل رقم (٢/٢) يوضح عمليات الانبعاث التلقائى (أ) والانبعاث المستحث (ب) والامتصاص (جـ) .

حيث : A_{21} يمثل احتمال الانتقال فى وحدة الزمن للانبعاث التلقائى من المنسوب رقم ٢ إلى المنسوب رقم ١ أى أن عدد انتقالات الخمود التلقائى فى الثانية =

$$N_2 \, A_{21}$$

وباعتبار أن B_{21} , B_{12} ثوابت تتناسب مع احتمالية الانتقال للانبعاث المستحث والامتصاص على الترتيب . فإذا كانت كثافة الإشعاع عند تردد υ هى u_υ فإن عدد الانتقالات إلى أسفل للانبعاث المستحث فى الثانية = $N_2 \, B_{21} \, u_\upsilon$

وعدد الانتقالات إلى أعلى (الامتصاص) فى الثانية = $N_1 \, B_{12} \, u_\upsilon$



شكل رقم (٢/٢) عمليات الانبعاث

تسمى المعاملات B_{12}, B_{21}, A_{21} بمعاملات أينشتين . وفى حالة الاتزان يكون معدل انتقال الذرات من المنسوب الأقل إلى الأعلى مساويا لمعدله من المنسوب الأعلى إلى الأقل :

$$N_2 A_{21} + N_2 B_{21} u_\upsilon = N_1 B_{12} u_\upsilon \qquad (2.1)$$

$$u_\upsilon = N_2 A_{21} \;/\; (N_1 B_{12} - N_2 B_{21})$$

$$= \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{\left(\frac{N_1}{N_2}\frac{B_{12}}{B_{21}} - 1\right)}$$

ولكن من قانون بولتزمان $N_1 = N_2 e^{h\upsilon/KT}$ ، حيث $h\upsilon = E_2 - E_1$

$$u_\upsilon = \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{\left(\frac{B_{12}}{B_{21}} e^{h\upsilon/KT} - 1\right)} \qquad (2.3)$$

وبالمقارنة مع صيغة قانون بلانك لكثافة الإشعاع ذى تردد υ

$$u_\upsilon = \frac{8\pi h v^3}{c^3} \frac{1}{\left(e^{h\upsilon/KT} - 1\right)} \qquad (2.4)$$

نحصل على العلاقتين الآتيتين لمعاملات أينشتين :

$$A_{21} = \frac{8\pi h v^3}{c^3} B_{21} \qquad (2.5)$$

$$B_{21} = B_{21} \qquad (2.6)$$

على ذلك ، ولمجموعة ذرات فى اتزان مع مصدر خارجى تكون النسبة بين معدل الانبعاث المستحث والانبعاث التلقائى هى :

$$\frac{1}{\left(e^{h\upsilon/KT}-1\right)}=\frac{N_2 B_{21} u_\upsilon}{N_2 A_{21}} \qquad (2.7)$$

وبالتعويض فى هذه العلاقة بقيمة درجة الحرارة T = ١٠^٣ كلفن نجد أن النسبة ضئيلة للغاية . هذا هو الحال فى مصادر الإضاءة العادية . ولما كان هذا الانبعاث الغالب يحدث كما ذكرنا نتيجة انتقالات عشوائية فإن الانبعاث التلقائى الصادر يكون غير مترابط ، لكنه فى أجهزة الليزر أمكن تكبير الانبعاث المستحث حتى أصبح هو الإشعاع الغالب . ومايصدر عن الليزر هوالفرق بين معدل الإشعاع المستحث ومعدل الامتصاص وهو مايسمى بالكسب النهائى . ويمكن إثبات أن معدل الانبعاث المستحث يكون أكبر من معدل الامتصاص إذا ماكان عدد الذرات N_2 فى منسوب الطاقة الأعلى E_2 أكبر من عدد الذرات N_1 فى منسوب الطاقة الأدنى E_1 . هذا هو الشرط اللازم للحصول على كسب نهائى أو الحصول على شعاع الليزر .

أى أن شرط حدوث الفعل الليزرى هو

$$E_2 > E_1,\ N_2 > N_1$$

والسؤال هو : هل يتحقق هذا الشرط فى مجموعات الذرات فى اتزان حرارى ؟ والإجابة بالنفى طبقا لقانون بولتزمان .

لذلك فشرط الحصول على شعاع الليزر هو عكس ماهو موجود فى الطبيعة ، أى يتطلب حدوث تعاكس فى توزيع عدد الذرات بين مناسيب الطاقة ، فيزداد عدد الذرات في مناسيب الطاقة العالية عن عدد الذرات فى مناسيب الطاقة المنخفضة .

من العلاقة الرياضية لقانون بولتزمان يمكننا أن نصنف هذا الوسط الذى فيه $N_1 < N_2$ ، فى حين أن $E_1 < E_2$ بأن درجة حرارته سالبة ، أى أن قيمة درجة الحرارة T فى المعادلة تصبح نظريا سالبة .

وينمو الشعاع بإمراره فى الوسط طبقا للعلاقة بين شدته I_υ وشدته الابتدائية $I_{0,\upsilon}$ وطول المسار x فى الوسط ومعامل الكسب α وهى :

$$I_\upsilon = I_{0,\upsilon}\, e^{\alpha x} \qquad (2.8)$$

وعند مرور الشعاع فى وسط عادى فإن قيمة α تكون سالبة ، وتمثل هذه العلاقة اضمحلال شدة الشعاع بزيادة طول مساره نتيجة امتصاصه . أما فى حالة الوسط الذى يتمتع بتعاكس إسكانى للذرات فإن α تكون موجبة ، ولهذا فإن شدة الشعاع تنمو وتزيد كلما سار مسارا أطول فى الوسط . لهذا يوضع الوسط بين مرآتين عاكستين ليتضاعف المسار عشرات المرات وتصل شدة الأشعة إلى قيمة ينطلق عندها شعاع الليزر ، قيمة يزداد فيها الكسب على الفاقد أثناء كل رحلة للشعاع بين المرآتين .

والحصول على وسط يتمتع بالتعاكس الإسكانى للذرات هناك طرق عدة ، منها :

١- الضخ الضوئى : وهو حادث فى ليزر الياقوت المطعم بالكروميوم .

٢- الإثارة بالالكترونات : وهو حادث فى ليزر الأرجون المتأين .

٣- تصادم الذرات : وهو حادث فى ليزر هيليوم – نيون .

٤- تفاعلات كيميائية : وهو حادث فى ليزر فلوريد الأيدروجين الكيميائى .

إذ تكون نتيجة التفاعل فى النوع الرابع هى جزئ أو ذرة تركت فى حالة إثارة ، ففى الليزر الكيميائى لفلوريد الأيدروجين ينتج عن التفاعل جزيئات فلوريد الأيدروجين المثارة $H_2 + F_2 = 2\,HF$ ، وعند توفر ظروف مواتية يحدث تعاكس إسكانى .

٢/٥- التعاكس الاسكانى للذرات : Population inversion

نتناول هنا الأساس النظرى وطرق الحصول على التعاكس فى إسكان الذرات فى مناسيب الطاقة . ولقد سبق أن ذكرنا عند تناول الأساس النظرى للفعل الليزرى قانون « بولتزمان » الذى يحدد توزيع الذرات فى مناسيب الطاقة لوسط فى اتزان حرارى ، وتبعا له يكون عدد الذرات فى منسوب الطاقة الأدنى أكبر من عدد الذرات فى منسوب الطاقة الأعلى ، ويحدد القانون النسبة بين العددين . ولكى يحدث تعاكس فى إسكان الذرات في مناسيب الطاقة فإن ذلك يتطلب إثارة الذرات عن طريق توفير طاقة تصب فى الوسط بهدف تقليل عدد الذرات فى المستوى الأدنى N_L وزيادة عدد الذرات فى المستوى الأعلى N_u ، وهذا هو مانعنيه بالتعاكس الاسكانى للذرات .

وتسمى هذه العملية بالضخ إذ يتم إعادة توزيع الذرات من مناسيب الطاقة وكأنه قد تم ضخها من المنسوب الأدنى إلى المنسوب الأعلى بالطرق التى سبق ذكرها .

وتاريخيا نجح العالم الأمريكى « تاونس Townes » عام (١٩٥٤) فى الحصول على التعاكس الإسكانى بواسطة حزمة من جزيئات الأمونيا وصنع الميزر الذى ينبعث منه أشعة بطول موجى ١,٢٥ سم . ولما كانت جزيئات الأمونيا موزعة على مناسيب الطاقة فى اتزان حرارى ، فقد أمكن تجمع الجزيئات فى المنسوب الأعلى وإخلاء المنسوب الأدنى منها بواسطة مجال كهربى غير متجانس ، وبذلك تم الحصول على التعاكس فى إسكان الجزيئات بين مناسيب الطاقة ، لكن هذه الطريقة التى تم بها الحصول على التعاكس الإسكانى عن طريق خفض عدد الجزيئات فى المنسوب الأدنى لايمكن تطبيقها بنجاح فى الانتقالات الضوئية ، إذ أنه طبقا لقانون بولتزمان فإن عدد الذرات N_u , N_L ترتبط بالعلاقة :

$$N_u = N_L \exp(-h\upsilon / K_B T)$$

حيث K_B هو ثابت بولتزمان ، ولما كانت $h\upsilon << K_B T$ فى مدى الموجات الميكرومترية فإن $N_L \approx N_u$ فى حين أن عدد الذرات N_u التى تسكن المنسوب الأعلى فى حالة الموجات الضوئية يكون صغيرا للغاية لأن $h\upsilon >> K_B T$ عند تردد υ فى مدى الموجات الضوئية . لهذا السبب ولكى نحصل على انبعاث مستحث فى المدى الضوئى فإنه لايكفى أن نزيل الذرات فى المستوى الأدنى أى نخلية منها ، إنما يلزم زيادة عدد الذرات فى المنسوب الأعلى بواسطة عملية الضخ .

نأخذ حالة نظام مكون من منسوبين . فنجد أن عند إثارة الذرات بالتشعيع أو بتصادمها مع الكترونات ، يزداد عدد الذرات التى تسكن المنسوب الأعلى لكنه فى نفس الوقت يزداد احتمال الخمود من المنسوب الأعلى الذى يرجع الذرات المثارة ثانية إلى المنسوب الأدنى بزيادة الضوء الساقط أو الألكترونات التى تدخل فى التصادم . والنتيجة هى أنه مهما كانت شدة إثارة الذرات ، فإنه لايمكن الحصول على التعاكس فى إسكان الذرات ، لهذا يلزم استخدام نظم تقوم على ثلاثة أو أربعة مناسيب ذرية للحصول على التعاكس الإسكانى . ولايتطلب ذلك بالضرورة دائما أن تكون مناسيب الطاقة مفردة أو حادة إنما يمكن استخدام مناسيب شريطية ، ولهذا فإنه يمكن اعتبار ليزر الصبغة وليزر أشباه الموصلات أنها تقوم على نظام المناسيب الأربعة التى سوف نتناولها بعد ذلك .

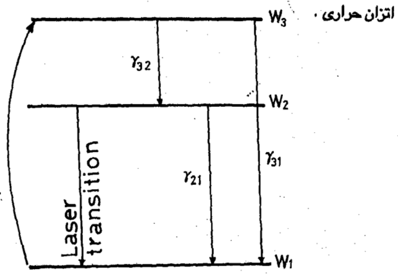
التماكس الإسكانى للذرات فى ليزر المناسيب الثلاثة

Population inversion in a three level laser :

يوجد عدد كبير من أنواع الليزر الذى يتم فيه الفعل الليزرى على أساس المناسيب الثلاثة ، مثل ليزر الياقوت وأنواع ليزر الغازات . دعنا نرمز للطاقة ولعدد الذرات التى تسكن المناسيب الثلاثة التى تدخل فى الفعل الليزرى كما يلى :

W_3, W_2, W_1 و N_3, N_2, N_1 كما هو موضح فى الشكل رقم (٣/٢)

$W_1 < W_2 < W_3$ فإن $N_3 < N_2 < N_1$ فى نظام المناسيب الثلاثة فى حالة اتزان حرارى .



شكل رقم (٣/٢) : رسم تخطيطى لمناسيب الطاقة فى نظام المناسيب الثلاثة

ويجدر بالذكر أن المنسوب الأدنى الذى يرمز له بالرقم ١ هنا ليس هو بالضرورة المنسوب الأرضى للذرة . ويتم إثارة الذرات من المنسوب رقم ١ إلى المنسوب رقم ٣ بواسطة التصادم مع فوتونات ، ألكترونات أو ذرات مثارة لها طاقة مناسبة . دعنا نرمز إلى احتمال إثارة الذرة من المنسوب ١ إلى المنسوب ٣ بالرمز Γ عن طريق أية طريقة للضخ . والشكل رقم (٣/٢) يقدم رسما تخطيطيا لمناسيب الطاقة لنظام المناسيب الثلاثة .

وعند إيقاف الضخ تعود الذرات المثارة تدريجيا إلى حالة الاتزان الحرارى ، وتعرف هذه العملية بالاسترخاء relaxation ، وهى تحدث متزامنة مع إثارة الذرات الأخرى . وبالاضافة إلى وجود عملية مشعة أى ينبعث عنها اشعاع ، حيث تنتقل الذرات المثارة إلى الحالة الأدنى

بإنبعاث فوتون ، توجد عمليات غير مشعة كالتى تحدث نتيجة تصادم جزيئات الفازات أو تفاعل الذرة مع الشبكة فى الجوامد ، حيث تنتقل الذرات المثارة إلى الحالة الأدنى عن طريق الإفراج عن طاقتها على هيئة طاقة حركة للجزيئات أو طاقة اهتزاز للشبكة . ولما كان الاسترخاء هو نتيجة هذه العمليات الاحصائية فإن معدل الاسترخاء أو ثابت الاسترخاء يعرف بأنه المتوسط الإحصائى لاحتمالات استرخاء الذرات المثارة فى وحدة الزمن ، وأن مقلوب معدل الاسترخاء هو متوسط عمر الذرات المثارة .

ترتبط الاحتمالية γ_{Lu} لذرة أثيرت حراريا من الحالة الأدنى W_L إلى الحالة الأعلى W_u بالاحتمالية γ_{uL} للعملية العكسية من W_u إلى W_L بالاسترخاء الحرارى بالعلاقة الآتية فى حالة الاتزان الحرارى :

$$N_u \gamma_{uL} = N_L \gamma_{Lu}$$

حيث :

$$N_u = N_L e^{-\left(\frac{W_u - W_L}{K_B T}\right)}$$

حيث T درجة حرارة الوسط .

وعلى ذلك فإن :

$$\frac{\gamma_{Lu}}{\gamma_{uL}} = e^{-\left(\frac{W_u - W_L}{K_B T}\right)} \qquad (2.9)$$

والعلاقة السابقة صحيحة حتى لو لم تكون N_L, N_u تمثلان عدد الذرات التى تشغل مناسيب الطاقة وهى فى حالة عدم اتزان حرارى .

وإذا كانت قيم هذه الاحتمالات ثابتة للحالات السابق ذكرها ، فإن المعادلات التى تعبر عن معدل تغير عدد الذرات فى كل منسوب من المناسيب الثلاثة للنظام تحت تأثير الضخ هى كما يلى :

$$\frac{dN_1}{dt} = -\left(\Gamma + \gamma_{12} + \gamma_{13}\right) N_1 + \gamma_{21} N_2 + \gamma_{31} N_3 \qquad (2.10)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \gamma_{12} N_1 - \left(\gamma_{21} + \gamma_{23}\right) N_2 + \gamma_{32} N_3 \qquad (2.11)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \left(\Gamma + \gamma_{13}\right) N_1 + \gamma_{23} N_2 - \left(\gamma_{31} + \gamma_{32}\right) N_3 \qquad (2.12)$$

حيث $N_1 + N_2 + N_3 =$ ثابت $= N =$ العدد الكلى للذرات التى تسكن المناسيب الثلاثة فى النظام .

والحالة المستقرة ، يمكن الحصول على توزيع عدد الذرات تحت الضخ المستمر عن طريق مساواة معدلات التغير بالصفر للمعادلات (٢-١٠ ، ٢-١١ ، ٢-١٢) ، وبالرغم من أنه يمكن حل المعادلات لنحصل على N_3, N_2, N_1 إلا أنه يمكن تبسيط الحسابات بافتراض أن التباعد - أى المسافات - بين المناسيب كبيرة بمقارنتها مع الطاقة الحرارية $K_B T$ ، وعند تطبيق المعادلة رقم (٢-٩) نجد مايلى :

$$\gamma_{12} << \gamma_{21}$$

$$\gamma_{23} << \gamma_{32}$$

$$\gamma_{13} << \gamma_{31}$$

لهذا فإنه يمكن إهمال γ_{12} ، γ_{13} ، γ_{23}، وتأخذ المعادلات (٢-١٠ ، ٢-١١ ، ٢-١٢) الصور الآتية للحالة المستقرة :

$$-\Gamma N_1 + \gamma_{21} N_2 + \gamma_{31} N_3 = 0 \qquad \Gamma N_1 = \gamma_{21} N_2 + \gamma_{31} N_3$$

$$-\gamma_{21} N_2 + \gamma_{32} N_3 = 0 \qquad \gamma_{21} N_2 = \gamma_{32} N_3$$

$$\Gamma N_1 - (\gamma_{32} + \gamma_{31}) N_3 = 0 \qquad \Gamma N_1 = (\gamma_{32} + \gamma_{31}) N_3$$

Therefore $\gamma_{21} (\gamma_{31} + \gamma_{32}) (N_1 + N_2 + N_3) =$

$$\gamma_{21} (\gamma_{31} + \gamma_{32}) N_1 + \gamma_{21} (\gamma_{31} + \gamma_{32}) N_2 + \gamma_{21} (\gamma_{31} + \gamma_{32}) N_3 =$$

$$\gamma_{21} (\gamma_{31} + \gamma_{32}) N_1 + \gamma_{32} N_3 (\gamma_{31} + \gamma_{32}) + \gamma_{21} \Gamma N_1$$

$$= \gamma_{21}\ (\gamma_{31} + \gamma_{32}) N_1 + \gamma_{32} \Gamma N_1 + \gamma_{21} \Gamma N_1$$

$$= N_1 \left\{ \gamma_{21}\ (\gamma_{31} + \gamma_{32}) + (\gamma_{21} + \gamma_{32}) \Gamma \right\}$$

ونحصل عى المعادلات (٢-١٣) ، (٢-١٤) التى تعطى قيم N_1 , N_2 كنسبة من العدد الكلى N .

$$N_1 = \frac{\gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32})}{\gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32}) + (\gamma_{21} + \gamma_{32})\Gamma} N \qquad (2\text{-}13)$$

$$N_2 = \frac{\gamma_{32}\Gamma}{\gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32}) + (\gamma_{21} + \gamma_{32})\Gamma} N \qquad (2\text{-}14)$$

وبقسمة المعادلتين (٢-١٣) ، (٢-١٤) نحصل على التعبير الرياضى الذى يعطى النسبة بين N_2 الى N_1 .

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\gamma_{32}\Gamma}{\gamma_{21}(\gamma_{31} + \gamma_{32})} = \frac{\Gamma}{\frac{\gamma_{21}}{\gamma_{32}}(\gamma_{31} + \gamma_{32})}$$

$$= \frac{\Gamma}{\gamma_{21}\left(1 + \frac{\gamma_{31}}{\gamma_{32}}\right)} \qquad (2\text{-}15)$$

وإذا كانت الإثارة قوية بالقدر الذى تكون فيه :

$$\Gamma > \gamma_{21} \left(1 + \frac{\gamma_{31}}{\gamma_{32}}\right)$$

فإن N_2 تكون أكبر من N_1 وهو شرط حدوث التعاكس فى إسكان الذرات .

على ذلك فإنه للحصول على التعاكس الإسكانى للذرات باستخدام ضخ متوسط القيمة ، يلزم أن تكون قيمة γ_{21} صغيرة ، فى حين أن قيمة γ_{32} تكون كبيرة بمقارنتها بقيمة γ_{31} . يعنى ذلك أنه من المرغوب فيه أن يكون الاسترخاء من المنسوب الأعلى لليزر إلى المنسوب الأدنى له بطيئا ، فى حين أنه يلزم أن يكون الاسترخاء من أعلى المناسيب – وهو المنسوب ٣ الذى أثيرت إليه الذرة فى البداية إلى المنسوب العالى ٢– يلزم أن يكون سريعا .

يتم حساب التعاكس الإسكانى – وقد سبق تعريفه – بأنه ΔN .

حيث $\Delta N = N_2 - N_1$ من المعادلتين (٢–١٣) ، (٢–١٤) كدالة فى شدة الإثارة Γ ، وتعبر عنه المعادلة رقم (٢–١٦) .

$$\Delta N = \frac{\gamma_{32}\Gamma - \gamma_{21}(\gamma_{31}+\gamma_{32})}{\gamma_{21}(\gamma_{31}+\gamma_{32}) + (\gamma_{21}+\gamma_{32})\Gamma} \quad N$$

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\gamma_{32}\Gamma - \gamma_{21}(\gamma_{31}+\gamma_{32})}{\gamma_{21}(\gamma_{31}+\gamma_{32})\left(1 + \frac{\gamma_{21}+\gamma_{32}}{\gamma_{21}(\gamma_{31}+\gamma_{32})}\Gamma\right)}$$

$$\Gamma_o = \frac{\gamma_{21}(\gamma_{31}+\gamma_{32})}{(\gamma_{21}+\gamma_{32})}$$

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\frac{\gamma_{32}}{(\gamma_{21}+\gamma_{32})}\frac{\Gamma}{\Gamma_o} - 1}{(1 + \frac{\Gamma}{\Gamma_o})} \qquad (2\text{-}16)$$

دعنا نمثل بيانيا تغير $\frac{\Delta N}{N}$ كدالة لشدة الإثارة Γ التى نعبر عنها بدلالة Γ_o .

حيث $$\Gamma o = \frac{\gamma_{21}(\gamma_{31}+\gamma_{32})}{(\gamma_{21}+\gamma_{32})}$$

وسوف نأخذ حالتين :

١– عندما تكون $\gamma_{32} = \gamma_{21}$

٢– عندما تكون $\gamma_{32} = 9\gamma_{21}$

ففى الحالة الأولى :

$$\frac{\Delta N}{N}=\frac{\left(\frac{1}{2}\frac{\Gamma}{\Gamma o}-1\right)}{\left(1+\frac{\Gamma}{\Gamma o}\right)}$$

$$\text{For } \frac{\Gamma}{\Gamma o}=o, \quad \frac{\Delta N}{N}=-1$$

$$\frac{\Gamma}{\Gamma o}=2, \quad \frac{\Delta N}{N}=o \qquad \frac{\Gamma}{\Gamma o}=10, \quad \frac{\Delta N}{N}=\frac{4}{11}$$

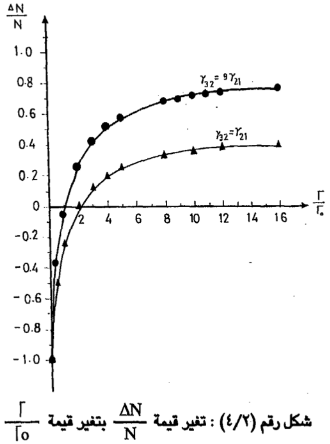
وفى الحالة الثانية :

$$\frac{\Delta N}{N}=\frac{\left(0.9\frac{\Gamma}{\Gamma o}-1\right)}{\left(1+\frac{\Gamma}{\Gamma o}\right)}$$

والجدول الآتى يعطى قيم $\frac{\Gamma}{\Gamma o}$ المقابلة لقيم $\frac{\Delta N}{N}$، والشكل رقم (٤/٢) يمثل بيانيا تغير $\frac{\Delta N}{N}$ مع شدة الإثارة $\frac{\Gamma}{\Gamma o}$ للحالتين المذكورتين (Shimoda 1984) .

جدول رقم (٢/٢)

$\frac{\Gamma}{\Gamma o}$	o	$\frac{10}{9}$	4	9	19	24
$\frac{\Delta N}{N}$	-1	o	0.52	0.71	0.81	0.82



شكل رقم (٢/٤) : تغير قيمة $\frac{\Delta N}{N}$ بتغير قيمة $\frac{\Gamma}{\Gamma o}$

وعندما تصل الإثارة إلى قيمة عالية للغاية نحصل على قيمة ΔN كما يلى :

$$\lim_{\Gamma \to \infty} \Delta N = \frac{\gamma_{32} N}{(\gamma_{21} + \gamma_{32})} = \frac{N}{\left(1 + \frac{\gamma_{21}}{\gamma_{32}}\right)} \qquad (2\text{-}17)$$

وفى حالة $\gamma_{21} = \gamma_{32}$ فإن $\frac{1}{2} \rightarrow \frac{\Delta N}{N}$، وتصل إلى 0.9 عندما تكون $\gamma_{32} = 9\gamma_{21}$.
ومن المعادلة رقم (٢-١٧) نستنتج أنه كلما نقصت قيمة γ_{21} وزادت قيمة γ_{32} زاد التعاكس الإسكانى الذى تبعا له ينتج فعل ليزرى أقوى .

التعاكس الإسكانى للذرات فى ليزر المناسيب الأربعة

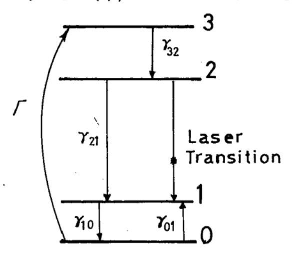
Population inversion in a four level laser

لما كان المنسوب الأدنى للانتقالات الليزرية هو أدنى المناسيب فى ليزر المناسيب الثلاثة ، فإن غالبية الذرات تكون فى ذلك المنسوب عند الاتزان الحرارى ، فتكون $N_1 \approx N$. لهذا

لكى يتم التعاكس الإسكانى للذرات يلزم أنقاص عدد الذرات التى تشغل هذا المنسوب الأدنى إلى أقل من النصف بالضخ الشديد . ويقل الالتزام بهذا المطلب كثيرا فى حالة ليزر المناسيب الأربعة .

دعنا نأخذ ذرة تحتوى على مناسيب طاقة أربعة كما هو موضح فى الشكل رقم (٢-٥) ، والمطلوب هو الحصول على التعاكس فى إسكان الذرات بين المنسوبين ٢ ، ١ . ولما كان المنسوب الأدنى لليزر الذى نرمز له بالرقم (١) يقع عند طاقة أعلى من $K_B T$ فوق المنسوب الأرضى O ، فإن عدد الذرات التى تم إثارتها حراريا فى المنسوب ١ يكون ضئيلا للدرجة التى يمكن بيسر الوصول إلى تعاكس فى إسكان الذرات عن طريق ضخ عدد صغير نسبيا من الذرات إلى المستوى الأعلى (٢) . ويتم التعبير عن شروط حدوث التعاكس الإسكانى فى هذه الحالة كما يلى :

بالرغم من أن الفرق بين طاقة المناسيب التى نرمز إليها بالأرقام (١) ، (٢) ، (٣) التى يفترض أنها أكبر بقدر كبير من $K_B T$ - كما فى حالة ليزر المناسيب الثلاثة - فإن عدد الذرات المثارة حراريا $\gamma_{01} N_o$ من المنسوب الأرضى o - وهو أغنى المناسيب فى عدد الذرات التى تشغله إلى المنسوب الذى نرمز له بالرقم (١) - لايمكن إهمالها .



شكل رقم (٥/٢) : رسم تخطيطى لمناسيب الطاقة فى نظام المناسيب الأربعة

وتصبح المعادلات التى تصف معدلات الانتقالات بين مناسيب الطاقة فى ليزر المناسيب الأربعة كما يلى :

$$\frac{dN_1}{dt} = \gamma_{01} N_0 - \gamma_{10} N_1 + \gamma_{21} N_2 + \gamma_{31} N_3$$

$$\frac{dN_2}{dt} = - \gamma_2 N_2 + \gamma_{32} N_3 \qquad (2\text{-}18)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \Gamma N_o - \gamma_3 N_3$$

$$-\frac{dN_0}{dt} = \frac{dN_1}{dt} + \frac{dN_2}{dt} + \frac{dN_3}{dt}$$

حيث $\gamma_3 = \gamma_{30} + \gamma_{31} + \gamma_{32}, \qquad \gamma_2 = \gamma_{20} + \gamma_{21}$

ونحصل على حل هذه المعادلات التفاضلية عند الاتزان الحرارى بمساواتها بالصفر كما فعلنا فى حالة ليزر المناسيب الثلاثة: $\gamma_{01} N_0 - \gamma_{10} N_1 + \gamma_{21} N_2 + \gamma_{31} N_3 = o$

$$- \gamma_2 N_2 + \gamma_{32} N_3 = o$$

$$\Gamma N_0 - \gamma_3 N_3 = o$$

$$\therefore N_3 = \frac{\Gamma}{\gamma_3} N_0 \qquad (2\text{-}19)$$

$$N_2 = \frac{\gamma_{32}}{\gamma_2} N_3 = \frac{\gamma_{32}}{\gamma_2 \gamma_3} \Gamma N_0 \qquad (2\text{-}20)$$

$$N_1 = \frac{1}{\gamma_{10}} \left(\gamma_{01} + \frac{\gamma_{21} \gamma_{32}}{\gamma_2 \gamma_3} \Gamma + \frac{\gamma_{31}}{\gamma_3} \Gamma \right) N_0$$

$$= \left(\frac{\gamma_{01}}{\gamma_{10}} + \frac{\gamma_{21} \gamma_{32} + \gamma_2 \gamma_{31}}{\gamma_{10} \gamma_2 \gamma_3} \Gamma \right) N_0 \qquad (2\text{-}21)$$

ولما كانت $N = N_0 + N_1 + N_2 + N_3$ ، وبالتعويض فى المعادلات رقم (٢-١٩) ، (٢-٢٠) ، (٢-٢١) نحصل على :

$$N_0 = \left(\frac{\gamma_{10} \gamma_2 \gamma_3 N}{\gamma_{01} \gamma_2 \gamma_3 + \gamma_{32} (\gamma_{21} + \gamma_{10}) \Gamma + \gamma_2 (\gamma_{31} + \gamma_{10}) \Gamma} \right) \qquad (2\text{-}22)$$

ومن المعادلتين (٢-٢٠) ، (٢-٢١) نجد أن N_2 تكون أكبر من N_1 عندما :

$$\frac{\gamma_{32}}{\gamma_2 \gamma_3} \Gamma N_0 > \left(\frac{\gamma_{01}}{\gamma_{10}} + \frac{\gamma_{21}\gamma_{32} + \gamma_2 \gamma_{31}}{\gamma_{10}\gamma_2\gamma_3} \Gamma \right) N_0$$

$$\Gamma \left(\frac{\gamma_{32}}{\gamma_2 \gamma_3} - \frac{\gamma_{21}\gamma_{32} + \gamma_2 \gamma_{31}}{\gamma_{10}\gamma_2\gamma_3} \right) > \frac{\gamma_{01}}{\gamma_{10}}$$

$$\Gamma \left(\frac{\gamma_{32}\gamma_{10} - \gamma_{21}\gamma_{32} - \gamma_2 \gamma_{31}}{\gamma_{10}\gamma_2\gamma_3} \right) > \frac{\gamma_{01}}{\gamma_{10}}$$

$$\therefore \Gamma > \frac{\gamma_{01}\gamma_2\gamma_3}{\gamma_{32}\gamma_{01} - \gamma_{21}\gamma_{32} - \gamma_2\gamma_{31}} \qquad (2\text{-}23)$$

هذا هو شرط حدوث التعاكس فى إسكان الذرات .

ونلاحظ وجود γ_{01} فى بسط المعــادلة الســابقة وهى احـتــمـال انتــقـال الذرات المثارة حراريا من المنسوب O إلى المنسوب (١) ، وقيمتها صغيرة كما هو واضح من العلاقة $\gamma_{01} = \gamma_{10} \exp(-W/K_BT)$ وعلى ذلك فــإن شــدة الإثارة Γ المطلوبة للحصول على التعاكس الإسكانى تقل .

ولما كانت $\gamma_{31} < \gamma_3 = \gamma_{31} + \gamma_{30} + \gamma_{32}$ ، $\gamma_{21} < \gamma_2 = \gamma_{21} + \gamma_{20}$

فإنه يمكن تقريب العلاقة (٢-٢٣) كما يلى :

$$\Gamma > \frac{\gamma_{01}\gamma_2\gamma_3}{\gamma_{10}\gamma_{32}} = e^{-\frac{W_1}{K_BT}} \gamma_2 \left(1 + \frac{\gamma_{31} + \gamma_{30}}{\gamma_{32}} \right) \qquad (2\text{-}24)$$

حيث $\gamma_{10} >> \gamma_2$

وبمقارنة العلاقة (٢-٢٤) بالعلاقة (٢-١٥) لإحداث التعاكس فى إسكان الذرات فى ليزر المناسـيب الثلاثة ، نلاحـظ أنهما متـماثلتان ، إلا فى وجـود المعـامل $\exp(-\frac{W_1}{K_BT})$ فى العلاقة (٢-٢٤) . ونظرا لوجود منسوب فى نظام المناسيب الأربعة يزيد عن نظام المناسيب

الثلاثة – وهو المنسوب الذى نرمز له بالرقم 0 – فإنه من الواضح أن $(\gamma_{21}+\gamma_{20})$ تحل محل $(\gamma_{31}+\gamma_{30})$، γ_{21} محل γ_{31}

وهنا يكون العامل $\exp\left(\frac{-W_1}{K_B T}\right)$ هو العامل الهام والمؤثر ، إذ يمكن الوصول إلى التعاكس الإسكانى للذرات حتى ولو كان الضخ ضعيفا إذا ماكان المنسوب الأدنى الذى نرمز إليه بالرقم (١) أعلى من المنسوب الأرضى 0 بقدر من الطاقة لايزيد كثيرا عن بضع مرات من قيمة $K_B T$.

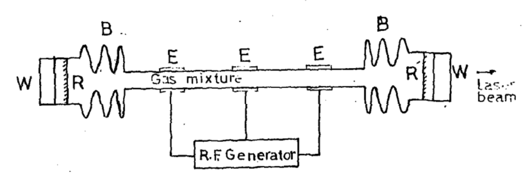
٦/٢ الفعل الليزرى فى ليزر الهيليوم – نيون :

قام "Javan, Bennett & Herriott" عام (١٩٦١) ببناء أول جهاز ليزر . وكان يتكون من أنبوبة تفريغ طولها ١٠٠ سنتيمتر ، وقطرها الداخلى ١,٥ سنتيمتر ، مملوءة بغاز الهيليوم عند ضغط ١ ملليمتر زئبق وبالنيون عند ٠,١ ملليمتر زئبق . واستخدمت مرآتان مستويتان متوازيتان ، ويبين الشكل (رقم ٦/٢) مكونات جهاز أشعة ليزر الهيليوم – نيون ، بينما يبين الشكل رقم (٧/٢) المناسيب الرئيسية لذرتى الهيليوم والنيون .

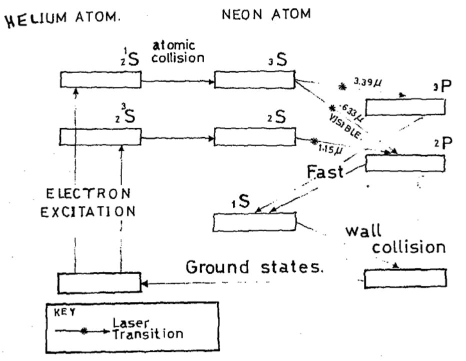
ويمكن أن تصل ذرات الهليوم عند المنسوب 2^3S بتصادم الألكترونات ، وهذه الحالة غير مستقرة ، وغير مسموح حدوث انتقال مباشر ومشع منها إلى المنسوب الأرضى ، وعندما تصطدم ذرات الهيليوم التى تشغل المنسوب 2^3S مع ذرات النيون فى المنسوب الأرضى تتم إثارتها ، ويمكن أن تنتقل الإثارة إلى ذرات النيون التى تصل فى النهاية إلى أحد مناسيب الطاقة 2 S ، التى يقع أعلاها بفارق ٣٠٠سم$^{-1}$ تحت منسوب طاقة الهيليوم 2^3S ، ويبين شكل (٧/٢) مناسيب الطاقة لذرتى الهيليوم والنيون .

ويمكن أن يحدث انتقال مشع من المناسيب الأربعة التى تكون 2 S إلى العشرة مناسيب التى تمثل 2 P ، ويمكن أن ينبعث إشعاع نتيجة انتقال من المناسيب 2 S لذرة النيون إلى المنسوب الأرضى ، لكن عند ضغط ١,٠مم زئبق لغاز النيون يتم احتباس هذا الاشعاع تماما . وتتحدد أعمار الذرات المثارة فى مناسيب الطاقة 2 S أساسا بالخمود المشع من المناسيب 2 P ، فهى أطول عمرا من أعمار الذرات فى المناسيب 2P وعمرها فى المناسيب 2 S هو ١٠$^{-7}$ ثانية فى حين أن أعمار الذرات فى المناسيب 2P هى ١٠$^{-8}$ ثانية لهذا يتم حدوث التعاكس الإسكانى للذرات أى الامتصاص السالب بين الانتقالات

المسموحة 2P ← 2S . فتخمد الذرات فى المناسيب 2P إلى المنسوب 1S غير المستقر ، وينبعث نتيجة ذلك الفوتونات ومنه إلى المنسوب الأرضى نتيجة تصادمها بجدران الأنبوبة . لهذا ثبت أن الكسب يتناسب عكسيا مع قطر الأنبوبة التى تحوى غازى النيون والهيليوم .



شكل رقم (٦/٢) : مكونات جهاز أشعة ليزر الهيليوم – نيون



شكل رقم (٧/٢) : المناسيب الرئيسية لذرتى الهيليوم والنيون

ولقد حصل « جافان ، بينت ، وهيريوت » على انبعاث مستحث لخمسة أطوال موجية فى منطقة الأشعة تحت الحمراء ، أعلاها شدة ضوئية عند ١٥٢٣ , ١ ميكرون . ويتم ذلك نتيجة انتقالات مستحثة من المناسيب 2 S الى 2 P لذرة النيون ، والإسكان فى مجموعة 2 S قد تم إثراؤه بانتقالات من المنسوب 2^3S لذرة الهيليوم كما هو موضح فى الشكل (٨/٢) .

وقد اكتشف العالمان « هوايت وريدجن White & Ridgen » عام (١٩٦٢) الانبعاث المستحث من ليزر هيليوم – نيوم فى المنطقة المنظورة التى يحدث نتيجة الانتقال $3S_2 \rightarrow 2P_4$ ، فالإسكان فى المنسوب الأعلى قد ازداد نتيجة انتقال الإثارة فى المنسوب 2 S لذرة الهيليوم . هذا الشعاع المنبعث من ليزر هيليوم – نيون هو أنسب الأشعة للاستخدام فى المحاذاة Alignment ، وطوله الموجى هو ٦٣٢٨ أنجستروم .

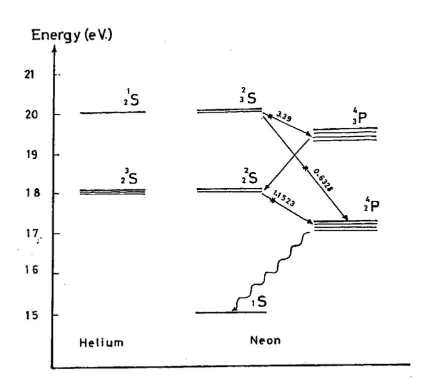
وبعد فترة وجيزة من اكتشاف هذا الشعاع الأحمر ، لاحظ العلماء « بلوم وبل وريمبل Bloom, Bell & Rempell » أن شعاعا فى منطقة الأشعة تحت الحمراء بطول موجى أطول من ٣ ميكرون كثيرا مايصاحب الشعاع المنبعث عند ٦٣٢٨ أنجستروم . هذا الشعاع ينبعث عند المنسوب $3P_4$ بطول موجى ٣,٣٩١٣ ميكرون ، وعلى ذلك فإن الفعل الليزرى الرئيسى فى نظام الهيليوم – نيون يعزى الى الانتقالات الآتية فى ذرة النيون :

$3S_2 \rightarrow 2\,P_4$ وينبعث عنه ٦٣٢٨ أنجستروم

$2S_2 \rightarrow 2\,P_4$ وينبعث عنه ١١,٥٢٣ أنجستروم

$3S_2 \rightarrow 3\,P_4$ وينبعث عنه ٣,٣٩ ميكرون

وبالإضافة الى هذه الأشعة أمكن الحصول على عدد من الانتقالات الضعيفة فى ذرة النيون (Lengyel 1966).



شكل رقم (٢/٨) : انتقالات مستحثة فى ليزر الهيليوم – نيون

٢/٧- الترابط : Coherence

يمكن وصف ترابط الموجات بمدى دقة تمثيلها بمنحنى يتبع دالة جيب التمام ، وسنعرف هنا نوعين مختلفين من الترابط ، يعبر النوع الأول عن العلاقة المتوقعة بين موجة فى لحظة ما والموجة بعد فترة زمنية لاحقة ، والنوع الآخر بين نقطة معلومة وأخرى على مسافة معينة منها . ويؤدى النوع الأول إلي مفهوم الترابط الزمنى Temporal coherence ، بينما يؤدى النوع الثانى إلى مفهوم الترابط الفراغى Spatial coherence .

الترابط الزمنى :

من المعلوم أنه حسب النظرية الكهرومغناطيسية ، فإن ذرات المصدر الضوئى لاتصدر موجات متصلة ، ويكون انبعاث الضوء على هيئة قطارات من الموجات Wave trains ، وتوجد علاقة بين طول هذا القطار والمدى الطيفى لاتساعه النصفى ، وكلما كان القطار طويلا كان المدى الطيفى لاتساعه النصفى قصيرا .

وسنتناول مقياس ميكلسون للتداخل الضوئى عند إضاءته بمصدر ضوئى صغير ، والشكل رقم (٢/٩) يوضح قطارا من الموجات الضوئية الساقطة (بين النقطتين A, O) .

وينقسم قطار الموجات عند I إلى قطارين ، أحدهما يسلك المسار (1) والثانى يسلك المسار (2) . ومن الشكل رقم (٩/٢) يتضح أنه إذا كان فرق المسار (2t) أقل من طول قطار الموجات المنبعث من S فإن قطارى الموجات فى المسارين (1) ,(2) ينطبقان ويحدث التداخل بينهما .

وينتشر قطار الموجات المتخذ المسار (2) لمسافة أطول قليلا من قطار الموجات المتخذ المسار (1) . وإزاحة قطار من الموجات بالنسبة للقطار الآخر يساوى الفرق فى المسار الناتج من مقياس التداخل الضوئى .

فرق المسار $(P.D.) = 2\,t$

وإذا كان فرق المسار (P.D.) صغيرا جدا بالنسبة لطول قطار الموجات ، فإن قطارى الموجات يتطابقان على امتداد معظم طوليهما ، وينتج تداخل ضوئى . وتكون هدب التداخل الضوئى حادة ضئيلة العرض ، وهذا هو الترابط الزمنى .

وكلما زاد فرق المسار وذلك بتحريك المرآة A إلى اليمين ، فإن مقدار تلاقى الموجات الخارجة من ذراعى مقياس التداخل الضوئى يقل ويصبح نموذج التداخل أقل حدة ، وتنخفض درجة تباين الهدب ورؤيتها Visibility .

وعندما يكون الفرق فى المسار (2t) أكبر من طول قطار الموجات ، فإن قطارى الموجات (a_1), (a_2) اللذين ينبعان من نفس قطار الموجات الأصلى A – لاينطبقان ولايحدث تداخل ضوئى . والشكل رقم (١٠/٢) يوضح أنه بالإمكان أن يتلاقى هذان القطاران ، ولكنهما لاينبعان من نفس قطار الموجات الأصلى حيث A تنبعث فى زمن مختلف عن ذلك الذى تنبعث فيه B ومزاحا عنه بمسافة مقدارها t_1 .

وبفرض أن فرق المسار (2t) فى مقياس التداخل الضوئى ذات قيمة بحيث لايلتقى قطارى الموجات (a_2), (a_1)، حيث (a_1) لاتظهر على الرسم ، الناتجتين من A . وبطريقة مماثلة فإن (b_1), (b_2) حيث (b_1) لاتظهر على الرسم ، الناتجتين من B لايلتقيان . بينما يمكن أن يتلاقى قطار الموجات b_1 (الذى يسلك المسار القصير (1) فى مقياس التداخل الضوئى) مع قطار الموجات (a_2) الذى يسلك مسارا أطول . ويمكن أن يعادل التأخر فى

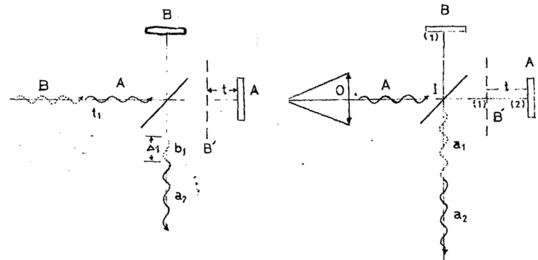
المسار = 2t (الذى سببه مقياس التداخل الضوئى) يعادل التأخر المبدئى t_1 بين القطارين B, A .

والإزاحة بين القطارين b_1, a_2 عندما تخرج من مقياس التداخل هى Δ_1 حيث :

$$\Delta_1 = (t_1 - 2t)$$

فلو كان من الممكن تسجيل هدب التداخل أثناء فترة تواجد قطارى الموجات ، فإنه يمكن رصد هدب التداخل لأن القطارين يتلاقيان وينطبقان . ومن الناحية الواقعية فإن فترة تواجد القطارين صغيرة للغاية عند استخدام المصادر الضوئية العادية ؛ لهذا فملاحظة هدب التداخل لاتتم لقصر فترة تواجدها . ويتم استقبال عدد وفير من قطارات الموجات فى الفترة الزمنية المطلوبة لرصد وتسجيل الحدث ، ولما كان انبعاث قطارات الموجات من الذرة المثارة لايمكن التنبؤ به لأن قيم فرق المسار t_2, t_1 ... تختلف بطريقة عشوائية مع الزمن . يحدث هذا أيضا بالنسبة للإزاحات عندما تترك القطارات الموجية مقياس التداخل والتى تكون لها قيم عشوائية $\Delta_3, \Delta_2, \Delta_1$ ، ... وسوف يوجد عدد هائل من هدب التداخل المختلفة أثناء الفترة المطلوبة لتسجيل الملاحظة أو الحدث . لهذا سوف لاتظهر هدب التداخل نقية ، ونحصل على مايطلق عليه اللاترابط الزمنى Temporal Incoherence ، ويسمى طول قطار الموجات بطول الترابط .

وإذا كانت الفترة الزمنية τ هى التى يتواجد فيها القطار ، فإن طول الترابط L يعطى من العلاقة $L = C\tau$ حيث C سرعة الضوء وتسمى τ بزمن الترابط .



شكل رقم (٢/٩) : مقياس ميكلسون للتداخل الضوئى ويظهر قطار الموجات بين A, O

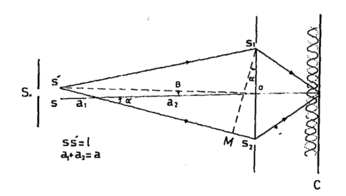
شكل رقم (٢/١٠) : تلاقى قطارين من الموجات فى مقياس ميكلسون للتداخل الضوئى

الترابط الفراغى : Spatial coherence

إذا رجعنا إلى تجربة الشق المزدوج لينج ، فإننا نجد أنه يمكن أن يحدث تداخل من المصادر الضوئية التقليدية بوضع فتحة ضيقة جدا S_o مباشرة أمام المصدر الضوئى . وهذه الظروف تؤكد أن قطارى الموجات اللذين يخرجان من الفتحتين S_2, S_1 ينبعان من نفس المنطقة الصغيرة من المصدر الأصلى . والشعاعين اللذين يخرجان من S_2, S_1 يكونان مترابطين بالنسبة لبعضهما . ولو حدث تغير فى طور الموجات المنبعثة من S_o ، فإن هذا التغير سينتقل فى نفس الوقت إلى كل من S_2, S_1 ، ولذلك فإنه يوجد فرق طور ثابت – عند أى نقطة على الحائل C- بين الشعاعين المنبعثين من المصدرين ، ويتكون نموذج مستقر للتداخل الضوئى .

وإذا زاد عرض الفتحة S_o بالتدريج فقد وجد تجريبيا أن النهاية العظمى لشدة الضوء (الهدبة المضيئة) على الحائل C تقل والنهاية الصغرى (الهدبة المعتمة) لاتصبح مساوية للصفر . وبعبارة أخرى تقل درجة تباين الهدب . وعندما تزيد S_o مرة أخرى ، فإن انخفاض قيمة I_{max} وارتفاع قيمة I_{min} تقلل من قيمة درجة تباين الهدب ، وتختفى هدب التداخل الضوئى وتظهر مكانها منطقة إضاءتها منتظمة . وتحت هذه الظروف يمكن القول بأن المصدرين S_2, S_1 قد تحولا تدريجيا من حالة الترابط الكامل إلى حالة اللاترابط incoherence الكامل . ويتضح ذلك من الشكل رقم (١١/٢) .

ولتفسير هذه الظاهرة نجد أنه إذا كانت الفتحة S_o عريضة بحيث إن أحد الفتحتين S أو 'S تضاء غالبا بإشعاع منبعث من مجموعة من الذرات ، أما الفتحة الأخرى فتضاء بإشعاع منبعث من مجموعة أخرى من الذرات ، فإنه بذلك تصبح الفتحتان تمثلان مصدرين غير مترابطين . أما فى حالة أن تكون الفتحة S_o ضيقة فإن الفتحتين 'S', S يتم إضاءتهما بشعاع منبعث من نفس المجموعة من الذرات .



شكل رقم (٢/١١) : تجربة الشق المزدوج لينج

وحيث إنه يمكن اعتبار أن المصدر الضوئى الممتد extended source يتكون من مصادر نقطية مستقلة ، فإنه من المناسب دراسة حالة مصدرين غير مترابطين ، أحدهما بالنسبة للآخر . افرض أن S', S فى الشكل رقم (٢/١١) هما موقعا مصدرين غير مترابطين ودعنا نحسب أقل مسافة بين S', S بحيث تكون :

$$S'S_2 - S'S_1 = \frac{\lambda}{2}$$

فإنه لاتظهر هدب تداخل على الحائل C لأنه عند المواقع التى تتكون عندها هدب مضيئة ناتجة من الثقب S_1 سوف يتم تكوين هدب مظلمة ناتجة من الثقب S_2 .

$$S'S_2 - S'S_1 = S_2M = \alpha\, d$$

$$\alpha = \frac{d/2}{a_2} = \frac{1}{a_1} l = S\,S',\ a_1 = \frac{l}{\alpha},\ a_2 = \frac{a_1}{l}\frac{d}{2} = \frac{1}{\alpha}\frac{d}{2}$$

$$\therefore a = a_1 + a_2 = \left(1 + \frac{d}{2}\right)\frac{l}{\alpha} \qquad \therefore \alpha = \left(1 + \frac{d}{2}\right)\frac{l}{a}$$

أى أن $(S'S_2 - S'S_1)$ تساوى تقريبا $\frac{ld}{a}$ ، بافتراض أن $l >> \frac{d}{2}$

وفى النهاية سوف تختفى هدب التداخل عندما تصل قيمة $\frac{ld}{a}$ إلى $\frac{\lambda}{2}$ ، ويعنى ذلك أنه إذا كان مصدر الإضاءة S'S ممتدا فإن الامتداد الفراغى سوف يزيد عن $\frac{\lambda a}{2d}$ ، وسوف لاتظهر هدب تداخل على الحائل .

كما أن

$$d = \frac{1}{2}\ \frac{\lambda a}{l}$$

$$= \frac{\lambda}{2\theta}$$

حيث θ هى الزاوية التى يحصرها S'S عند O .

وتعرف الكمية $\frac{\lambda}{\theta}$ بأنها اتساع الترابط العرضى ونرمز له l_W .

على ذلك فإنه لإجراء تجربة «ينج» باستخدام شق مزدوج ، يلزم أن تكون المسافة بين الشقين أقل بكثير من اتساع الترابط العرضى للحصول على هدب التداخل . وعند استخدام مصدر إضاءة ممتد ، يدخل بارامتر تتوقف قيمته على شكل المصدر فى التعبير عن الاتساع العرضى للترابط l_W ، فإذا كان المصدر دائريا ، فإن الاتساع العرضى للترابط تعطيه العلاقة الآتية :

$$l_W = \frac{1.22\lambda}{\theta}$$

وإذا اخترنا قيمة لفرق المسار L_1 التى عندها يتم تكوين هدب تداخل ناتجة من حدى الطول الموجى λ, $\lambda + \Delta\lambda$ إنما تكون مضيئة لإحدى الموجتين ومظلمة للأخرى ، فإنه يمكننا اشتقاق علاقة تقريبية تربط L مع $\Delta\lambda$. فإذا تكونت هدب مظلمة عند المركز ناتجة من الأشعة التى طول موجتها λ وهدبة مضيئة ناتجة من الأشعة التى طول موجتها $\lambda + \Delta\lambda$ ، فإننا نحصل على العلاقة $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L}$ واشتقاقها هى كما يلى :

$$L = m\lambda = (m - \frac{1}{2})(\lambda + \Delta\lambda)$$

$$L = (\frac{L}{\lambda} - \frac{1}{2})(\lambda + \Delta\lambda)$$

$$2L / (\frac{2L}{\lambda} - 1) = \lambda + \Delta\lambda$$

$$m\lambda = m\lambda + m\Delta\lambda - \frac{1}{2}\lambda - \frac{1}{2}\Delta\lambda$$

$$\lambda = (2m - 1)\Delta\lambda$$

$$2L / (\frac{2L}{\lambda} - 1) = 2m\Delta\lambda$$

$$\therefore \Delta\lambda = \lambda / (\frac{2L}{\lambda} - 1)$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L} \text{ if we assume } L >> \lambda$$

والعلاقة السابقة علاقة تقريبية ، ويمكن الحصول على العلاقة الصحيحة باستخدام تحولات فورييز ، والعلاقة هى : $L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$

حيث L هى طول الترابط ، $\Delta\lambda$ هى عرض خط الطيف أو اتساعه بمقياس الطول الموجى .

نقاء خط الطيف وطول ترابط فوتوناته :

يرتبط مفهوم طول الترابط مباشرة بدرجة نقاء خط الطيف ، ويتناظر خط الطيف أحادى طول الموجة تماما مع منحنى جيبى ، ولذلك فتكون قيمة τ له لانهائية . ولكن يوجد لأى خط طيف حد أقصى للمسافة الفاصلة بين المرآتين ، بعدها لايمكن أن يحدث تداخل . ويمكن تفسير ذلك بأنه ينبعث من المصادر أحادية الطول الموجى أطوالا موجية موزعة باستمرار بين $\lambda + \Delta\lambda, \lambda$. وعندما يكون فرق المسار صغيرا فإن هدب التداخل الضوئى الدائرية لجميع الأطوال الموجية المشاركة تكون عمليا متطابقة . ولكنه بزيادة فرق المسار فإن معدل انفراج الدوائر ومعدل إنتاج هدب جديدة فى المركز يختلفان لكل طول موجى بين λ و $\lambda + \Delta\lambda$.

وكذلك فإنه يتضح أن مدى التردد $\Delta\upsilon$ يتناسب عكسيا مع زمن الترابط τ ، أو Δt, ، ويتبع العلاقة : $\tau\,\Delta\upsilon \approx 1$

وطبقا لذلك فإنه لإجراء تجربة تداخل ضوئى يستخدم فيها الشق المزدوج – كما فى تجربة ينج – يجب أن تكون المسافة بين الفتحتين أقل من طول الترابط العرضى ، وذلك للحصول على هدب تداخل ضوئى مميزة . والشكل رقم (١٢/٢) يوضح هذا المفهوم ، وقطارات الموجات مبينة على هيئة منحنيات جيبية ، والمنحنيات الموجودة على الجانب الأيمن توضح المكونات الطيفية للضوء المقابلة لهذه القطارات . وإذا كان فرق المسار (2t) أكبر من طول الترابط ، فإن قطارات الموجات لاتتطابق ولايحدث تداخل ضوئى . ويمكن الوصول إلى الاستنتاجين الهامين الآتيين :

أ– لكى يمكن رؤية نموذج التداخل الضوئى الناتج من المصادر الضوئية ، لابد أن يكون فرق المسار الضوئى فى مقياس التداخل أقل من طول الترابط للمصدر .

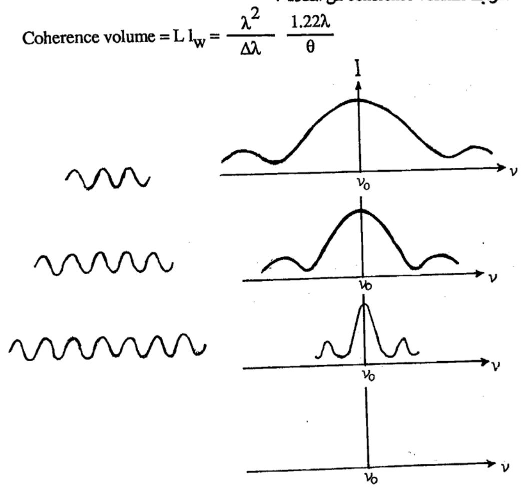
ب- تصبح هدب التداخل الضوئى أكثر حدة كلما قل فرق المسار الضوئى فى مقياس التداخل وذلك بالنسبة لطول الترابط الضوئى للمصدر ، والتردد υ_0 هو متوسط تردد الموجات المنبعثة . وعند الحد النظرى ينبعث قطار لانهائى من الموجات يتكون من ضوء أحادى طول الموجة ترددها υ_0 .

والشكل رقم (١٢/٢) يوضح العلاقة بين طول قطار الموجات وطيف الضوء المنبعث .

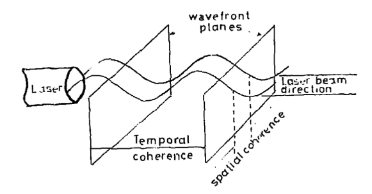
والشكل رقم (١٣/٢) يوضح الترابط الفراغى والترابط الزمنى لشعاع من الليزر .

ومكونات الترابطين هى جزء من رسم ذى أربعة أبعاد تصف تماما درجة ترابط شعاع الليزر . وبالنسبة لمصدر دائرى ، ولمدى أو زمن الترابط coherence interval ، يعطى حجم الترابط coherence volume من المعادلة :

$$\text{Coherence volume} = L\, l_W = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}\ \frac{1.22\lambda}{\theta}$$



شكل رقم (١٢/٢) : العلاقة بين طول قطار الموجات وطيف الضوء المنبعث



شكل رقم (١٢/٢) : الترابط الفراغي والترابط الزمني لشعاع من الليزر

٨/٢- الكثافة الضوئية لشعاع الليزر : Optical density of a laser beam

التوزيع الفراغي لشعاع الليزر : Spatial distribution of a laser beam

يتبع بروفيل الشدة الضوئية لشعاع TEMoo منحنى توزيع جاوس ويحكم بواسطة تأثيرات الحيود التي تحدث عند الحواف ، والمعادلة الآتية تعبر عن توزيع الشدة الفراغية spatial intensity لهذا النمط :

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2 / w^2)$$

حيث r هي المسافة مقاسة من مركز الشعاع ، w هي ثابت يعرف متوسط نصف قطر الشعاع ، ويسمى spot size حيث تقل الشدة إلى $\frac{1}{e^2}$ من قيمة أعلى شدة للشعاع عند مركز التوزيع .

ويظل هذا الشكل محتفظا به عند مرور الشعاع خلال الفراغ ويعاني من زيادة في اتساع عرضه وتشويه نتيجة العوامل الجوية . وعند النقطة $\frac{1}{e^2}$ تقل الشدة إلى ٨٦,٤٧٪ .

ويعبر عن انفراج الشعاع beam divergence بوحدات المللي ريدينز $(\Phi = \frac{S}{r}\text{rad.})$ milli-radians . والزاوية Φ معبرا عنها بالوحدات القطرية تساوي طول القوس S الذي يقابل المركز والمحدد بالشعاعين مقسوما على نصف القطر r .

زاوية نصف قطرية واحدة $= \frac{١٨٠}{\pi} = ٥٧,٣°$.

ويعبر عن أقل انفراج للشعاع بالمعادلة :

$$\Phi = \frac{4\lambda}{\pi D}$$

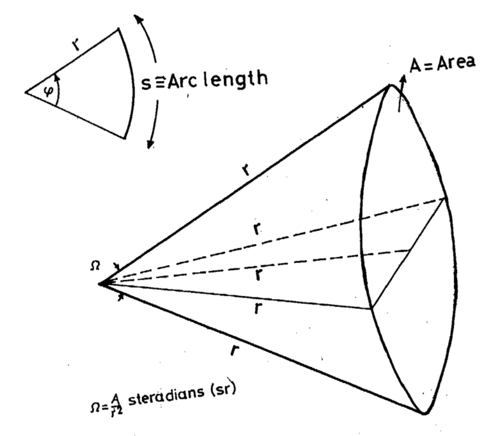
حيث D هى أقل عرض للشعاع .

وامتد هذا المفهوم إلى الثلاثة أبعاد وذلك بإدخال الزاوية المجسمة Ω معبرا عنها بوحدات الاستراديان steradians (sr) (حيث $\Omega = \frac{A}{r^2}$ كما هو موضح بالشكل رقم ١٤/٢) .

ولسطح نصف كرة فإن الزاوية المجسمة Ω تعطى من المعادلة .

$$\Omega = \frac{A}{r^2} = \frac{2\pi r^2}{r^2} = 2\pi \quad sr.$$

وينحصر الشعاع الخارج من جهاز الليزر فى زاوية أقل من ١٠^-٦ استراديان(10^{-6} sr).



شكل رقم (١٤/٢) : الزاوية المجسمة معبرا عنها بوحدات الاستراديان (sr)

٢/٩- شدة شعاع الليزر : Intensity of laser beam

تعتمد شدة شعاع الليزر على قدرة الشعاع ومساحة مقطعة ، والطريقة التى ينتشر بها من نقطة إلى أخرى فى الفراغ . وتعرف القدرة بأنها المعدل الزمنى لفعل الشغل ، وهى معدل استخدام أو إنتاج الطاقة . والعلاقة بين الطاقة والقدرة والزمن تعطيها المعادلة :

$$\Phi = \int_0^{\tau} P(t)\, dt$$

معبرا عن الكميات بوحدات الراديومترك radiometric units كالآتى :

Φ = الطاقة بالجول .

p (t) = القدرة بالوات .

dt = الزمن بالثانية .

τ = زمن تكرار النبضة pulse duration بالثانية .

ولذلك فإن واحد وات يكافئ واحد جول / ثانية ، وشدة شعاع الليزر يعبر عنه بـ irradiance بالمعادلة الآتية :

$$\frac{\text{Power}}{\text{area of the beam}} = \frac{\text{average value of beam power}}{\text{average value of beam cross-section}}$$

وذلك بوحدات وات / سم٢ . ويقيم شعاع الليزر المستمر بوحدات الوات أو المللى وات ، ويقيم الليزر النبضى بالطاقة الكلية معبرا عنها بوحدات جول / نبضة .

وبينما الشدة I تساوى عدد الفوتونات الساقطة على وحدة المساحات فى الثانية ، فإن كثافة الطاقة energy density أو energy optical density تساوى عدد الفوتونات فى وحدة الحجوم فى الثانية ، ولذلك فإن :

$$\text{energy density} = \frac{I}{c}$$

حيث c هى سرعة الضوء لنفس مدى التردد .

طول الترابط لمصدر إضاءة ، درجة تباين الهدب وأقصى فرق مسار

Coherent length of illuminating source, fringe visibility and maximum path difference :

توزيع الشدة الضوئية فى هدب التداخل الضوئى الثنائى مأخوذا فى الاعتبار عرض خط الطيف المستخدم كمصدر إضاءة :

من المعلوم أنه فى حالة ضوء أحادى طول الموجة فإن توزيع الشدة الضوئية لهدب التداخل الضوئى الثنائى تعطيها المعادلة :

$$I = 4\, a^2 \cos^2 \frac{\Delta}{2}$$

حيث a هي سعة كل من الموجتين المتداخلتين ، Δ هى فرق الطور بينهما .

لندرس حالة مقياس التداخل الضوئى لميكلسون ، ولنفترض أن المرآة نصف المفضضة تقسم سعة الأشعة السابقة إلى جزئين متساويين A_υ ، أحدهما يتجه إلى المرآة المرجع والآخر يتجه إلى المرآة الأخرى وبفرض أن خط الطيف متجانس ومنتظم حول منتصفه وذو عرض نصفى $\Delta\sigma$ نتيجة لتأثير دوبلر ، فإن الشدة الضوئية I_υ للأشعة المنبعثة ذات التردد υ - إذا كان المصدر يعانى فقط من تأثير دوبلر - تعطيها العلاقة :

$$I_\upsilon = e^{-\alpha(\upsilon-\upsilon_0)^2} \text{ and } \Delta\sigma = 2\sqrt{\frac{0.69}{\alpha c^2}}$$

وتوزيع الشدة الضوئية لهدب التداخل تعطيها المعادلة (٢-٢٥) حيث :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} A_\upsilon^2 \cos^2\left(2\pi\upsilon\frac{D}{2c.}\right) d\upsilon \qquad (2.25)$$

$A^2 = I_\upsilon$ شدة الأشعة الساقطة .

D = فرق المسار بين شعاعين متداخلين .

c = سرعة الضوء .

$$I=\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha(\upsilon-\upsilon_o)^2}\left(1+\cos 2\pi\upsilon\frac{D}{c}\right)d\upsilon$$

ولإجراء التكامل نضع $(\upsilon - \upsilon_o) = X$

$$d\upsilon = dx$$

$$I=\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2}\left[1+\cos 2\pi(\upsilon_o+x)\frac{D}{c}\right]dx$$

$$=\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2}dx+\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2}\left[\cos 2\pi\frac{D}{c}\upsilon_o\cos 2\pi\frac{D}{c}x\right.$$

$$\left.-\sin 2\pi\frac{D}{c}\upsilon_o\sin 2\pi\frac{D}{c}x\right]dx$$

$$I=\cos 2\pi\frac{D}{c}\upsilon_o\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2}\cos\left(2\pi\frac{D}{c}x\right)dx$$

$$-\sin 2\pi\frac{D}{c}\upsilon_o\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2}\sin\left(2\pi\frac{D}{c}x\right)dx$$

وإذا كانت الدالة $F(x)$ متجانسة حول المركز υ_o وكانت هذه الدالة احادية فإن :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\sin bx\,dx=0$$

$$\therefore\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2}\sin\left(2\pi\frac{D}{c}x\right)dx=0$$

$$I=\cos 2\pi\frac{D}{c}\upsilon_o\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2}\cos\left(2\pi\frac{D}{c}x\right)dx$$

ولكننا نعلم أن :

$$\int_{o}^{+\infty} e^{-\alpha x^2}\cos bx\,dx=\sqrt{\pi}\frac{e}{2\alpha}^{-\frac{b^2}{4\alpha^2}}$$

$$I = 2\cos 2\pi \frac{D}{c} \upsilon_o \int_o^{+\infty} e^{-\alpha x^2} \cos\ (2\pi \frac{D}{c} x)\, dx$$

$$= 2\cos 2\pi \frac{D}{c} \upsilon_o\ [\sqrt{\pi} \frac{e^{-\frac{4\pi D}{4\alpha c^2}}}{2\sqrt{\alpha}}]$$

$$= \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\alpha}} e^{-\frac{4\pi^2 D^2}{4\alpha c^2}} \cos 2\pi \frac{D}{c} \upsilon_o$$

$$\therefore I = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\alpha}} [1 + e^{-\frac{\pi^2 D^2}{\alpha c^2}} \cos 2\pi \frac{D}{c} \upsilon_o] \qquad (2.4)$$

هذه هى المعادلة التى تعطى توزيع الشدة الضوئية فى هدب التداخل الضوئى الثنائى ، أخذين فى الاعتبار عرض خط الطيف كمصدر للضوء . وهذه هى الحالة التى فيها يتبع توزيع الطول الموجى المنبعث من المصدر بروفيل دوبلر ، وبالتالى يتبع بروفيل التردد للموجات توزيع جاوس .

٢/١٠- درجة تباين هدب التداخل الضوئى الثنائى : The visibility of two-beam fringes

عرف « فيزو Fizeau » درجة تباين الهدب (V) بالمعادلة الآتية :

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

وهى تساوى الواحد الصحيح فى حالة هدب التداخل الضوئى الثنائى بافتراض أن الضوء أحادى طول الموجة تماما ، أى ليس له اتساع طيفى نظريا . وهذا يعني أن درجة تباين الهدب تظل ثابتة مع زيادة فرق طول المسار . ولكن بوجود خطوط طيفية ذات عرض محدد ، فإن تغير درجة تباين الهدب مع فرق المسار D يعتمد على عرض خط الطيف . وقد درس « ميكلسون » تأثير عرض خط الطيف على درجة تبادين الهدب الناتجة فى مقياس ميكلسون للتداخل الضوئى .

وقد وجد أن الخط الأحمر فى طيف الكادميوم يتمتع ببروفيل طيفى يتبع توزيع دوبلر ، أى أنه يعانى من تأثير دوبلر دون العوامل الأخرى التى تسهم فى اتساع خط الطيف ، وأمكنه قياس عرضه الطيفى .

وقدم Terrien ١٩٥٧ ، ١٩٦٠ علاقات بين درجة تباين الهدب فى حالة التداخل الضوئى الثنائى وعددا من الخصائص الطيفية لأضواء أحادية الطول الموجى ، والنتائج العملية لقياس درجة تباين الهدب وتفسيرها من الوجهة الطيفية . وقد درس درجة التباين فى حالة البروفيل المنتظم كبروفيل دوبلر الناتج من تأثير درجة الحرارة على حركة الذرات المثارة ، بروفيل الرنين وبروفيل دوبلر والامتصاص الذاتى مجتمعين . وقد استخدم فى تجاربه العملية مصدرى إضاءة ، هما نظير الكريبتون ٨٦ ونظير الزئبق ١٩٨ .

وبالتعويض فى المعادلة (٢-٢٥) التى تعطى توزيع الشدة الضوئية فى هدب التداخل الثنائى ، نحصل على العلاقة بين درجة التباين V وفرق المسار D واتساع أو عرض خط الطيف إذا كانت الأشعة الضوئية التى تضئ مقياس التداخل تتبع توزيع جاوس لتردداتها أى تعانى فقط من ظاهرة دوبلر .

$$\therefore I = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}\,[\,1 + e^{-\frac{\pi^2 D^2}{\alpha c^2}} \cos 2\pi \frac{D}{c} \upsilon_o\,]$$

$$I_{max} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}\,[\,1 + e^{-\frac{\pi^2 D^2}{\alpha c^2}}\,], \quad \text{and}$$

$$I_{min} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}\,[\,1 + e^{-\frac{\pi^2 D^2}{\alpha c^2}}\,]$$

$$V = e^{-\frac{\pi^2 D^2}{\alpha c^2}}$$

وطبقا لما اقترحه « فيزو » فإنه يمكن اعتبار قيمة V تساوى ٢٪ ، وهى أقل قيمة للتباين تسمح برؤية الهدب وإجراء قياسات عليها .

$$\text{For } V = 0.02, \quad \frac{\pi^2 D^2 m}{\alpha c^2} = 3.913$$

ولكن:

$$(\Delta \sigma)^2 = \frac{2.7726}{\alpha c^2}$$

نتيجة تأثير دوبلر حيث D_m هو فرق المسار المقابل لدرجة تباين V مقدارها = ٠,٠٢

$$\Delta\sigma\, D_{v=0.02} = 1.048$$

ولذلك فإن أقصى فرق مسار يمكن عنده الحصول على هدب تداخل ضوئى ثنائى فى مقياس ميكلسون ، أى أن أقصى طول لقدود القياس العيارية التى تحصر طولا محددا بين طرفين مستويين متوازيين تعطيه العلاقة :

$$D_m = \frac{1.048}{\Delta \sigma}$$

ويمكن أن نستنتج من هذه العلاقة أنه فى حالة خط طيفى له بروفيل دوبلر :

أ- تقل درجة تباين الهدب بانتظام مع فرق المسار D للخط المفرد singlet حسب المعادلة .

$$V = e^{-\frac{\pi^2 D^2}{\alpha c^2}}$$

$$= e^{-\frac{\pi^2 D^2 (\Delta\sigma)^2}{2.77}}$$

ب- فرق المسار D يتناسب عكسيا مع العرض النصفى $\Delta\,\sigma$ للخط الطيفى المستخدم كمصدر إضاءة .

وتم عمليا تعيين درجة تباين هدب التداخل الضوئى المتكونة عند مسافة معينة من مستوى ثابت كمرجع ، وقد استخدم مصباح نظير الزئبق ١٩٨ وضبطت درجة الحرارة عند ٢٠°م باستخدام منظم لدرجة الحرارة وتم التشغيل عند تردد ثابت ١٩٠ - ٢١٠ ميجاسيكل / ثانية ، واختير خط الطيف الأخضر ذو طول الموجة ٥٤٦٠,٧٥ أنجستروم .

وبالتعويض فى المعادلة التى سبق اشتقاقها لخط طيفى له بروفيل جاوس فقط وبدون امتصاص ذاتى ، أى $(\Delta\sigma.\ D_m = 1.048)$ بقيمة D_m التى استنتجت من المنحنى بين D, V وجد أن :

العرض النصفى $\Delta\sigma = \frac{١,٠٤٨}{٥٤}$ لمصباح نظير الزئبق ١٩٨ Hg^{198}

أى أن $\Delta\sigma$ = ٠,٠١٩ سم-١

ويمكن حساب العرض النصفى $\Delta\sigma$ فى حالة $D_{1/2}$ ، أى فرق المسار الذى يصل عند درجة تباين الهدب V_0 المعينة عند فرق مسار = صفر إلى نصف قيمتها ، وذلك بالتعويض فى المعادلة (٢-٢٥) بقيمة $V = 0.05$ عند $D = D_{1/2}$ ونحصل على $D_{1/2} = 0.44$ هذه العلاقة قد حصل عليها "Valasek" عام (١٩٤٩) ، وأفاد بالقيم الآتية لمصباح نظير الزئبق ١٩٨ $\Delta\sigma = 0.017\ cm^{-1}, D_{1/2} = 24.8\ cm$ لدرجة من الدقة $0.002\ cm^{-1}$ عند ٢٢°م .

وأفاد "Barell" عام (١٩٥١) بالقيمة $0.0156\ cm^{-1}$ عند درجة ١٧°م .

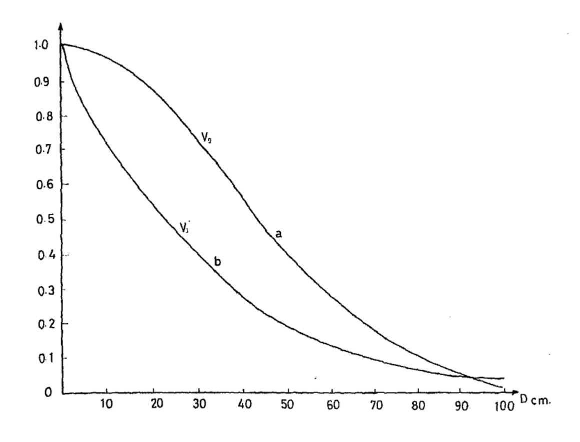
وتم تعين طول الترابط Lc لمصباح نظير الزئبق ١٩٨ عام (١٩٨٨)- Sharaf and Amer - باستخدام مقياس التداخل المقارن للعالم الألمانى "Köster" ، وهو المقياس المناسب لقياس ومعايرة قدود القياس المصنوعة من الصلب والتى لها طرفان مستويان ضوئيان ومتوازيان ، وكانت النتيجة هى ٥٨ سم .

أما فى حالة مصدر ضوئى تعانى أشعته من اتساع طيفى ناتج من الضغط داخل أنبوبة المصدر ، فإن بروفيله يتبع توزيع لورنتز ، والعلاقة الآتية تعطى درجة التباين للهدب الناتجة من التداخل الضوئى الثنائى فى هذه الحالة :

$$V = e^{-\frac{\pi D \Delta V_L}{C}} = e^{-\pi D \Delta\sigma}$$

حيث D هو فرق المسار بوحدات السنتيمتر ، $\Delta\sigma$ هى العرض الطيفى النصفى بوحدات cm^{-1} .

ويبين الشكل (١٥/٢) منحنيات التباين مع فرق المسار D لهدب التداخل الناتجة فى حالتى مصدرين ، يتبع أولهما توزيع جاوس والثانى توزيع لورنتز .



شكل رقم (٢/١٥) : تغير درجة التباين مع فرق المسار D لهدب التداخل الناتجة فى حالتى مصدرين :
(a) تتبع توزيع جاوس (b) تتبع توزيع لورنتز

References

Barrell H 1951 Proc. Roy Soc A **209** 132

Fowles G R 1968 Introduction to Modern Optics (New York : Holt, Rinehart and Winston Inc) pp 262-284.

Javan A, Bennet W R and Herriott D R 1961 Phys Rev Letters **6** 106.

Lengyel B A 1966 Introduction to Laser Physics (New York : John Wiley)

Sharaf F and Amer A 1993 Optics and Laser Technology (in press).

Shimoda K 1984 Introduction to Laser Physics (Berlin : Springer-Verlag).

Terrien J 1960 Symposium No 11 Interferometry H.S.O. p 437.

Terrien J, Hamon J and Masui T 1957 C.R. Acad Sci 245, 960.

Valasek J 1949 Introduction to Theoretical and Experimental Optics (Chapman & Hall) p. 144.

الفصل الثالث

مقدمة عن تركيب الألياف

An Introduction to Fibre Structure

يتناول الفصل الثالث الموضوعات الآتية : طرق فحص تركيب الألياف ، الخصائص الضوئية المتباينة Optical anisotropy للألياف الطبيعية والتركيبية والألياف المرتبة جزيئاتها ترتيبا منتظما تلك التى تتميز بقيمة عالية للانكسار المزدوج highly oriented fibres ، والتركيب الطبقى للألياف التركيبية والألياف البصرية .

٣/١- طرق فحص تركيب الألياف :

Methods of investigating the structure of fibres

فيما يلى قائمة بالطرق المختلفة المستخدمة لهذا الغرض :

أ- الميكروسكوب الضوئى .

ب- الميكروسكوب الألكترونى الماسح .

جـ- الميكروسكوب الألكترونى النافذ .

د- حيود الأشعة السينية .

هـ- أطياف الأشعة تحت الحمراء .

و- التداخل الضوئى الثنائى .

ز- التداخل الضوئى المتعدد عند النفاذ وعند الانعكاس .

ويمكن للقارئ عند استخدام الميكروسكوب الضوئى والميكروسكوب الألكترونى أن يرجع إلى المراجع فى هذه المجالات مثل: Stoves (1957), Françon (1961), Meredith and Hearle (1959), and Wells (1974)

ويتميز الميكروسكوب الألكترونى الماسح بقوة تحليل فراغية spatial resolution كبيرة وبعمق مجاله depth of field ، ولذلك فإنه يوفر معلومات تفصيلية عن المعالم التركيبية

للألياف . ويمكن الحصول على معلومات عن بروفيل معامل الانكسار بالنسبة للألياف البصرية بتعريض إحدى نهايتى الشعيرة للتآكل etching باعتبار أن معدله يعتمد على مكونات الشعيرة فى المواضع المختلفة .

وعندما يزود الميكروسكوب الألكترونى الماسح بمطياف الأشعة السينية القادر على فصل مناسيب الطاقة ، يمكن الحصول على معلومات كمية عن التأثيرات الناتجة من التغيرات في تركيب الشعيرة من المرجعين الآتيين : -(Wells (1974) & Kita et al, (1971 .

وبمقارنة خصائص شدة الأشعة السينية الناتجة من فحص شعيرة لعينة عيارية ، يمكن تعيين مكونات الشعيرة من العناصر التى لايزيد رقمها الذرى عن الرقم الذرى للبريليوم (Burrus et al., 1973) .

وسوف يتناول الفصلان الخامس والتاسع نظرية النظم البصرية للتداخل الضوئى الثنائى وتكوينها وأنواع ميكروسكوبات التداخل وتطبيقاتها لتعيين الخواص الضوئية للألياف المستخدمة فى المنسوجات وكذلك للألياف البصرية المستخدمة فى التراسل الضوئى .

كما سيتناول الفصل السادس نظرية هدب التداخل الضوئى المتعدد عند النفاذ وعند الانعكاس وتكوينها وخصائصها وتطبيقاتها لتعيين الخواص الضوئية للألياف الطبيعية والتركيبية والبصرية .

٣/٢- تباين الخواص الضوئية فى الألياف :

Optical anisotropy in fibres

٣/٢/١- الألياف الطبيعية والتركيبية : Natural and synthetic fibres

عندما يمر شعاع ضوئى أحادى طول الموجة ومستقطبا استوائيا خلال نظام من الجزيئات المرتبة ، فإنه يعانى انكسارا ، نتيجة تفاعل الضوء مع المادة . ويختلف هذا التفاعل باختلاف المتجه الكهربى electric vector للشعاع الضوئى الساقط والمستقطب استوائيا . ولهذا المتجة الكهربى اتجاهان هما :

١- فى اتجاه محور الشعيرة .

٢- فى الاتجاه العمودى عليه .

وتعرف المادة فى هذه الحالة بأنها متباينة الخواص الضوئية optically anisotropic ويكون لها انكسار مزدوج – أى قيمتان لمعامل الانكسار ، أحدهما للضوء المستقطب فى اتجاه مواز لمحور الشعيرة والآخر فى الاتجاه العمودي عليه – ويقاس الانكسار المزدوج birefringence بالفرق بين قيمتى معاملى الانكسار المذكورين . وتتركب الألياف الطبيعية والتركيبية من جزيئات انتظمت فى سلاسل طويلة ، تقع على امتداد محور الشعيرة ، وتكون السلاسل فى بعض الألياف موازية تماما فى أغلبها للمحور ، وتفقد هذه الصفة فى ألياف أخرى .

وتختلف الخصائص الضوئية للألياف باختلاف اتجاه انتشار الأشعة بالنسبة لمحور الشعيرة ، ويصل الاختلاف فى هذه القيم إلى الحد الأقصى عند استخدام ضوء مستقطب فى اتجاه مواز للمحور وفى الاتجاه العمودى عليه ، وتوجد علاقة مباشرة بين الخصائص الضوئية للألياف والخصائص الضوئية للجزيئات المكونة لهذه الألياف ، إذ أن التفاعلات الداخلية بين الجزيئات المتجاورة المكونة لهذه الألياف ضئيلة للغاية ويكون معامل انكسار مادة الشعيرة للضوء المستقطب فى أى اتجاه مساويا لمجموع خصائص الجزيئات المكونة لهذه الألياف فى نفس الاتجاه (Bunn, 1949) ولدراسة الخواص الضوئية للألياف يستخدم ضوء مستقطب فى اتجاه مواز لمحور الشعيرة وكذلك فى الاتجاه العمودى عليه ، وتوجد عدة طرق لتعيين معامل انكسار الألياف من بينها طريقة الحد الفاصل لبيك (Becke line) وطرق التداخل الضوئى .

وتعطى طريقة الحد الفاصل لبيك معامل انكسار القشرة الخارجية للشعيرة التى قد تختلف فى تركيبها عن الأجزاء الداخلية للشعيرة (Hartshorne and Stuart, 1970) ، وفى طريقة بيك تغمس الشعيرة فى سائل معروف معامل انكسار مادته يوضع على شريحة زجاجية ، ويظهر خط مضئ عند الحد الفاصل للشعيرة والسائل . وبملاحظة هذه الظاهرة بميكروسكوب ضوئى نجد أن هذا الخط المضئ يتحرك فى اتجاه الوسط ذو معامل الانكسار الأعلى وذلك عند رفع العدسة الشيئية للميكروسكوب قليلا ، أى بزيادة البعد بين الشعيرة والعدسة الشيئية .ويمكن دراسة أنواع الألياف المختلفة والتى لها معاملات انكسار متباينة باستخدام مجموعة سوائل لها معاملات انكسار عيارية . ويختفى الخط المضئ عندما

يتساوى معاملا انكسار السائل والشعيرة ، ويسمى هذا السائل بسائل المضاهاة matching liquid ويعين معامل انكسار الشعيرة للضوء المستقطب أحادى طول الموجة المستخدم . والانكسار المزدوج للألياف (birefringence Δn) يساوى الفرق بين معاملي الانكسار $n^{\parallel}$ فى اتجاه محور الشعيرة ، $n^{\perp}$ فى الاتجاه العمودى عليه :

$$\Delta n = n^{\parallel} - n^{\perp}$$

وبتطبيق طرق التداخل الضوئى الثنائى والمتعدد – التى سنتناولها فى الفصلين الخامس والسادس – يمكن تعيين معاملات انكسار لب الشعيرة core وقشرتها cladding ، وكذلك معاملات الانكسار المزدوج لها $\Delta n_s, \Delta n_c$ للب الشعيرة وقشرتها على الترتيب .

وقدم "Kuhn and Grün" ١٩٤٢ أول نظرية تربط بين التركيب الجزيئى للبلمرات أحادية المحور البصرى uniaxially oriented polymers وخصائها الضوئية الناتجة من تباين خصائصها التركيبية . وعند سحب الألياف التركيبية من مصهور بعض البلمرات عن طريق الانبثاق من ثقوب دقيقة يتم تكوين هذه الألياف وتكون فى أغلبها متماثلة isotropic الخواص الفيزيائية ، ونعنى بذلك ثبوت خصائصها وعدم تغيرها مع الاتجاه داخل الشعيرة ، ثم يتم سحب هذه الألياف ميكانيكيا للحصول على ألياف قوية تصلح للاستخدام فى الأغراض الصناعية ، وتكتسب هذه الألياف المسحوبة خصائص ضوئية وميكانيكية غير متماثلة (anisotropy) ، وتعتمد درجة عدم التماثل على مقدار الشد المستخدم فى السحب . وتعطى قيم معاملات الانكسار المتوسطة $n_a^{\perp}$, $n_a^{\parallel}$ والانكسار المزدوج المتوسط Δn_a للألياف معلومات هامة ومميزة يتم على أساسها توصيف هذه الألياف .

معاملات الانكسار واستقطابية الروابط الكيميائية

Refractive indices and bond polarisability

إن لتعيين الخواص الضوئية المتباينة للألياف أهمية كبيرة ، حيث تقدم هذه الخواص معلومات عن درجة انتظام الجزيئات بالنسبة لمحور الشعيرة ، ويؤدى ذلك إلى التعرف على تأثير المعاملات الكيميائية والميكانيكية على الألياف وتقييمها . ولهذه المعلومات ارتباط كبير فى ابتكار طرق حديثة لضبط الجودة فى كثير من الصناعات . ولقد قدم "Denbigh"

١٩٤٠ طريقة لتقييم الخواص المتباينة للجزيئات molecular anisotropy تعتمد على مفهوم استقطابية الروابط الكيميائية وعلى حساب القيمة الاستقطابية لكل رابطة فى جميع أنواع الروابط الكيميائية الموجودة فى تركيب معين ، وفى معالجته لهذا الموضوع اعتبر "Denbigh" أن كل رابطة كيميائية لها استقطابيتها ، وأن استقطابية الجزيئات هى حصيلة تجميع إسهام جميع هذه الروابط . وتسمح هذه الطريقة بحساب معامل الانكسار لمركب ما . ولايجمع متوسط استقطابية كل رابطة عندما تكون لها اتجاهات مختلفة كما هو الحال فى البلورات متباينة الخواص anisotropic ، إذ أنه من الضرورى فى هذه الحالة إدخال الاختلاف فى الاتجاه فى الاعتبار باستخدام مجسم على شكل قطع ناقص يدور حول أحد محوريه الأساسيين polarisability ellipsoid .

وتعطى المعادلة الآتية – Bunn, 1961- الاستقطابية α فى اتجاه معين لـ polarisability ellipsoid لجزئ متعدد الذرات :

$$\alpha = \sum \alpha_L \cos^2 \theta + \sum \alpha_T \sin^2 \theta$$

وتجمع لكل الروابط . حيث θ هى الزاوية بين الرابطة والاتجاه المعين ، α_T, α_L هما الاستقطابية الطولية والعرضية على الترتيب .

وتنطبق هذه المعادلة على حالة بلورة حيث يمكن حساب الاستقطابية فى اتجاه أساسى . ويحسب معامل الانكسار فى هذا الاتجاه من الاستقطابية باستخدام معادلة- Lorentz : Lorenz

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \; \frac{M}{d} = \frac{4}{3} \pi N \alpha_K$$

حيث n معامل الانكسار المناسب $n^{\parallel}$ أو $n^{\perp}$ أو M, n الوزن الجزيئى لكل وحدة طول ، d كثافة المادة ، N عدد أفوجادرو ، α_K معامل الاستقطابية لوحدة كاملة متكررة فى سلسلة البوليمر .

ولقد حسب "Hamza and Sikorski" (١٩٧٨) معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لألياف الـ Poly (p-phenylene terephthalamide) (PPT) باستخدام النموذج الجزيئى لهذا البوليمر الذى قدمه "Northolt " (١٩٧٤) وقيم استقطابية الروابط الكيميائية التى قدمها "Denbigh" (١٩٤٠) و "Bunn and Daubeny" وذلك بالتعويض فى صيغة Lorentz-Lorenz .

٢/٢/٣- الألياف التى انتظمت أغلب جزيئاتها فى سلاسل موازية لمحور الشعيرة : Highly oriented fibres

تتبع ألياف الـ PPT المذكورة فى الفقرة السابقة مجموعة الألياف المرتب أغلب جزيئاتها ترتيبا منتظما ، وبالتالى تتميز بقيم عالية للانكسار المزدوج . ويمكن للشعيرة التى لها معامل إجهاد tensile modulus أعلى من $40\ GN\ m^{-2}$ أن تصنف على أنها ألياف ذات ترتيب عال للجزيئات . ويتضح طبقا لهذا التحديد أن ألياف النسيج التقليدية والمتضمنة ألياف النايلون ذات قوة الشد العالية high-tenacity ، وألياف البولى استر لاتدخل ضمن هذه المجموعة من الألياف .

وتعطى الدراسات التى قدمها "Keller" (١٩٦٨) على بلورة البوليمر والتى توضح قابلية البوليمر لتكوين بلورات ذات سلاسل مطوية folded - chain تعطى مفهوما واضحا للعلاقة بين التركيب الدقيق للبلمرات وخواصها الفيزيائية . ومن أمثلة الألياف العضوية ذات قوة التحمل العالية الـ high-performance organic fibres نجدها فى ألياف الـ PPT .

ونذكر هنا الكفلار والتاورون وهى أسماء تجاريه لألياف الـ PPT . ولألياف الكفلار ٤٩ خواص فيزيائية متميزة، فمثلا لها قوة شد عالية ومنحنى الإجهاد – الانفعال لهذه الألياف يمثله خط مستقيم ويوضح سلوكا مرنا (elastic) عند تمديد extension صغير جدا . وحيث إن ألياف الكفلار ٤٩ لها قوة شد نسبى – نسبة قوة الشد إلى وزنها النوعى – متميزة ، فإنها تستخدم كدعامات reinforcement للمواد المتراكبة composite materials .

ولقد استخدم " Carter and Schenk " (١٩٧٥) حيود الأشعة السينية والقياسات الضوئية – معامل الانكسار المزدوج – لربط الخواص الفيزيائية لهذا النوع من الألياف مع تركيبها ، وتوجد علاقة وثيقة بين معامل الإجهاد وترتيب الجزيئات حول المحور فى هذه الألياف . واستخدمت حيود الاشعة السينية عند قيم الزوايا الكبيرة (High-angle) لدراسة الترتيب المنتظم للنظام الشبكى lattice order .

وعين "Northolt" (١٩٧٤) أبعاد وحدة الخلية لألياف الـ PPT على أساس أنها أحادية الميل monoclinic وفيها :

$a = 0.719$ nm, $b = 0.518$ nm, $c = 1.29$ nm and $\gamma = 90°$.

وقدم "Dobb and McIntyre" (١٩٨٤) دراسة تفصيلية عن تركيب ألياف الـ PTT وخصائصها الفيزيائية .

وتقدم قيم معاملات الانكسار $n^{\parallel}$ و $n^{\perp}$ طريقة مناسبة لمعرفة ترتيب الجزيئات فى اتجاه محور الشعيرة وفى الاتجاه العمودى عليه ، بينما تقدم قيم معاملات الانكسار المزدوج طريقة لتقييم درجة انتظام وتقارب وتباعد الجزيئات فى كل منطقة من مناطق الألياف متباينة الخواص الضوئية . وغالبا ما تضاف هذه القياسات الضوئية إلى نتائج طرق الفحص الأخرى باستخدام حيود الأشعة السينية والميكروسكوب الألكترونى وطيف الأشعة تحت الحمراء لتعطى صورة متكاملة عن تركيب الألياف .

ولقد حسب "Hamza and Sikorski" (١٩٧٨) قيم معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لألياف الـ PPT ، واستخدما ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا مع الضوء الأبيض والضوء أحادى طول الموجة المستقطب فى الاتجاهين ، الموازى لمحور الشعيرة والعمودى عليه – انظر الفصلين الخامس والتاسع – وقيست معاملات الانكسار والإنكسار المزدوج لألياف الكفلار ٤٩ باستخدام سائل معامل انكساره $n_L = 1.656$ وضوء أحادى طول الموجه ، وكانت النتائج كالاتى :

$$n^{\parallel} = 2.267,\ n^{\perp} = 1.605 \text{ and } \Delta n = 0.662$$

وذلك عند طول الموجة λ = ٥٤٦ نانومتر . ويلاحظ أن قيمة الانكسار المزدوج عالية جدا بالمقارنة بالألياف الأخرى التقليدية .

وناقش المؤلفان النتائج النظرية والتجريبية لمعاملات انكسار مادة الكفلار . ويعطى الجدول رقم (١/٣) قيم معاملات الانكسار n والانكسار المزدوج Δ n لبعض الألياف الطبيعية والتركيبية .

جدول رقم (١/٣) : معاملات الانكسار $n^{\parallel}$, $n^{\perp}$ والانكسار المزدوج Δn لبعض الألياف الطبيعية والتركيبية :

Fibre	$n^{\parallel}$	$n^{\perp}$	Δn	Reference
Cotton	1.578	1.532	0.046	Preston (1933)
Ramie and flax	1.596	1.528	0.068	preston (1933)
Viscose rayon	1.539	1.519	0.020	Preston (1933
Viscose rayon (skin)	1.5563	1.5282	0.0281	Faust (1952)
(core)	1.5536	1.5304	0.0234	Faust (1952)
Viscose rayon (skin)	1.5453	1.5226	0.0227	Barakat and Hindeleh (1964)
(core)	1.5441	1.5247	0.0194	
Wool	1.557	1.547	0.010	Hartshorne and Stuart (1970)
Polyethylene	1.574	1.522	0.052	Hartshorne and Stuart (1970)
Polypropylene	1.530	1.496	0.034	Hartshorne and Stuart (1970)
Acrilan	1.517	1.519	-0.002	Barakat and El-Hennawi (1971)
Acrilan	1.511	1.514	-0.003	Hartshorne and Stuart (1970)
Nylon 6	1.575	1.526	0.049	Hartshorne and Stuart (1970)
Nylon 6 (skin)	1.5533	1.5448	0.0085	Hamza *et al* (1985b)
(core)	1.5512	1.5430	0.0082	Hamza *et al* (1985b)
Nylon 66	1.578	1.522	0.056	Hartshorne and Stuart (1970)
Terylene	1.706	1.546	0.160	Hartshorne and Stuart (1970)
Dralon	1.5201	1.5234	-0.0033	Hamza *et al* (1985b)
Kevlar 49	2.267	1.605	0.662	Hamza and Sikorski (1978)

٣/٢/٣- التركيب الطبقى للألياف التركيبية :

Layer structure in synthetic fibres

استخدم "Hamza and Kabeel" (١٩٨٦) هدب التداخل الضوئى المتعدد لفيزو لقياس معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لألياف البولى بروبيلين . وقيست إزاحات هذه الهدب فى الطبقات المختلفة التى تكون الألياف غير المسحوبة undrawn وعين معامل الانكسار لكل طبقة . ويبين الشكل (١/٣) صورة هدب التداخل الضوئى المتعدد لفيزو عند النفاذ لألياف البولى بروبيلين ، واستخدم فى هذه التجربة ضوء مستقطب أحادى طول الموجة (λ= ٥٤٦,١ نانومتر) يتذبذب فى مستوى (أ) مواز لمحور الشعيرة ، (ب) عمودى على محورها .

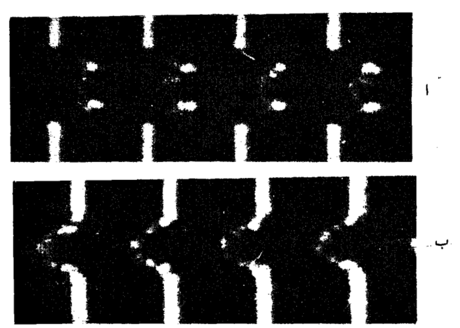
ولإجراء هذه التجربة استخدم مسطحان ضوئيان مفضضان ، يميل أحدهما على الآخر ويحصران بينهما سائلا (معامل انكسار مادته ١,٥٠١٥ عند درجة حرارة ٢٢,٥°م) غمرت فيه شعيرة . ولوحظ وجود ثلاث طبقات تكون الشعيرة ظهرت من تتبع هدب التداخل الضوئى عبر الشعيرة .

ونقتصر هنا على ذكر نتائج تعيين معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لكل من الثلاث طبقات فقط ، حيث إن تطبيق نظرية هدب التداخل الضوئى المتعدد لفيزو على الألياف متعددة الطبقات سوف ترد بالتفصيل فى الفصل السادس . ويحتوى الجدول رقم (٢/٣) على قيم معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لكل طبقة من طبقات ألياف البولى بروبيلين باستخدام ضوء ذات طول موجه λ = ٥٤٦,١ نانومتر عند درجة حرارة ٢٢,٥°م ، ومنه يتضح أن أنصاف أقطار الطبقات الثلاث هى :

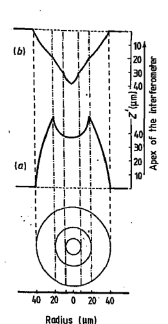
$$r_1 = 36.3\ \mu m, \quad r_2 = 18.8\ \mu m \quad \text{and} \quad r_3 = 9.6\ \mu m.$$

حيث r_1 هى نصف القطر الخارجى للشعيرة .

وكما هو موضح فى الفصل السادس الآتى فإن كل طبقة تساهم فى إزاحة الهدبة التى مقدارها Z خلال المقطع العرضى للشعيرة والممتدة بمقدار X مقاسة من منتصف الشعيرة ، وتظهر على شكل نصف قطع ناقص على المستوى (X, Y) ، حيث تتكون هدب التداخل الضوئى . ويبين الشكل رقم (٢/٣) إزاحة الهدبة عند استخدام الضوء أحادى طول الموجة ، ويتذبذب فى كلا الاتجاهين الموازى والعمودى على محور الشعيرة على الترتيب .



شكل رقم (١/٣) : هدب التداخل المتعدد عبر ألياف البولى بروبيلين ، ويوضح وجود التركيب الطبقي للشعيرة على هيئة ثلاث طبقات باستخدام ضوء أحادى الطول الموجى ويتذبذب (أ) فى مستوى مواز لمحور الشعيرة ، (ب) فى مستوى عمودى على محورها (من Hamza and Kabeel, 1986)



شكل رقم (٣/٢) : منحنى تغير إزاحة الهدبة مع البعد عن مركز الشعيرة باستخدام ضوء يتذبذب فى مستوى (أ) موازى لمحور الشعيرة (ب) عمودى عليه (من Hamza and Kabeel, 1986)

جدول رقم (٣/٢) : لقيم معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للطبقات المكونة لألياف البولى بروبيلين عند استخدام ضوء أحادى طول الموجة عند ٥٤٦,١ نانومتر ودرجة حرارة ٢٢,٥°م :

(Hamza and Kabeel 1986)

The mean refractive indices and mean birefringence of the fibre ‡				Refractive indices and birefringence of fibre layers ‡								
				First layer (outer layer)			Second layer			Third layer (core)		
Refractive index of liquid +, n_L	$n_a^{\parallel}$	$n_a^{\perp}$	Δn_a	$n_1^{\parallel}$	$n_1^{\perp}$	Δn_1	$n_2^{\parallel}$	$n_2^{\perp}$	Δn_2	$n_3^{\parallel}$	$n_3^{\perp}$	Δn_3
1.5015	1.5028	1.5001	0.0027	1.5032	1.5007	0.0025	1.5015	1.5000	0.0015	1.5014	1.4995	0.0019

+ The error in measuring n_L using an Abbe refractometer is ± 0.0002.
‡ The error in $n^{\parallel}$ and $n^{\perp}$ is ± 0.0007.

٣/٣- تركيب الألياف البصرية : The structure of optical fibres

٣/٢/١- أنواع الألياف البصرية : Types of optical fibres

تتركب شعيرة الألياف البصرية فى أبسط صورها من إسطوانتين من زجاج السيليكا مختلفتين فى الإشابة ومتحدتين فى المحور كما هو موضح فى الشكل رقم (٣/٣) ، وهو

عبارة عن شعيرة ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة step-index . ويعنى بذلك أن المنحنى الذى يمثل تغير معامل الانكسار عبر الشعيرة لبها وقشرتها core and cladding ، يتميز بثبات قيمة معامل انكسار لب الشعيرة بالإضافة الى ثبات معامل انكسار قشرتها ، وإن معامل إنكسار مادة لب الشعيرة أكبر من معامل انكسار مادة قشرتها ، وتحتوى معظم الألياف البصرية على أكثر من طبقتين .

ويوضح الشكل رقم (٤/٣) شعيرة بصرية ذات لب متغير معامل الانكسار ، محاطة بقشرة معامل انكسارها ثابت القيمة ثم غطاء أو سترة Jacket بلاستيكية لحماية الشعيرة من الخدش ومسببات الإتلاف الأخرى .

وتسمى الألياف الممثلة فى الشكل رقم (٤/٣) بالألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار graded index (GRIN) ، حيث يتناقص معامل انكسار لب الشعيرة على امتداد نصف القطر كلما بعد الموضع عن مركز الشعيرة ، وتكون أقصى قيمة لمعامل الانكسار عند محور الشعيرة .

ويوضح الشكل رقم (٥/٣) المقطع العرضى وبروفيل معامل الانكسار لبعض أنواع الألياف البصرية وكذلك أبعاد لب وقشرة الشعيرات .

وفيما يلى أنواع الألياف البصرية :

أ- ألياف ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة ، وهى عبارة عن إسطوانة من مادة عازلة وضعت فى الهواء ، رقم (أ) فى الشكل (٥/٣) » .

ب- ألياف بصرية عديدة المنوال ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة ، « رقم (ب) فى الشكل (٥/٣) ».

جـ- ألياف بصرية وحيدة المنوال ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة ، « رقم (جـ) فى الشكل (٥/٣) » .

د- ألياف بصرية يأخذ فيها بروفيل معامل الانكسار الشكل W ، ويحاط لب الشعيرة بقشرتين ، الداخلية معامل انكسارها n_1 والخارجية معامل انكسارها n_2 ، حيث $n_2 < n_1$ « رقم (د) فى الشكل (٥/٣) » .

هـ- ألياف بصرية متدرجة معامل الانكسار وعديدة المنوال ، وفيها معامل انكسار لب الشعيرة n (r) يتغير بتغير البعد r عن مركز الشعيرة طبقا للمعادلة :

$$n^2(r) = n^2(0)\left[1 - \Delta_1\left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha}\right]$$

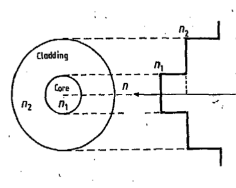
حيث

$$\Delta_1 = \frac{\Delta^2}{n^2(0)} = \frac{n^2(0) - n_1^2}{n^2(0)}$$

وتأخذ α القيم : $1.5 < \alpha < 2.5$

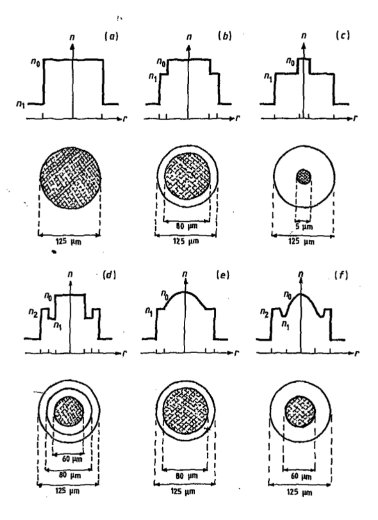
وتكون أعلى قيمة لمعامل الانكسار n (r) عند محور الشعيرة ، وهذه الألياف ممثلة فى رقم (هـ) فى الشكل (٣/٥) .

و- ألياف بصرية ذات لب متدرج معامل الانكسار ، ويأخذ فيها بروفيل معامل الانكسار الشكل W ، « رقم (و) فى الشكل (٣/٥) » .



شكل رقم (٣/٣) : مقطع عرضى لشعيرة ذات بروفيل معامل انكسار من درجة واحدة توضح ثبات معامل انكسار لب الشعيرة وقشرتها .

شكل رقم (٣/٤) : مقطع عرضى لشعيرة ذات بروفيل متدرج لمعامل انكسار لبها يوضح شكل تغيره وثبات معامل انكسار قشرتها .



شكل رقم (٣/٥) : مقاطع عرضية وأبعاد وبروفيل معامل الانكسار لأنواع مختلفة من الألياف البصرية . (From Costa, 1980)

وتحدد البارامترات الآتية خصائص الألياف البصرية ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة : step-index :

نصف قطر لب الشعيرة (a) ، الاتساع العددى numerical aperture (NA) الذى يعرف بالمعادلة :

$$NA = (n_0^2 - n_1^2)^{\frac{1}{2}}$$

حيث n_0 معامل انكسار مادة لب الشعيرة ، n_1 معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة .

وترتبط قيمة الاتساع العددى بأقصى زاوية قبول maximum acceptance للأشعة الداخلة للشعيرة بالبارامتر V الذى تعطيه المعادلة :

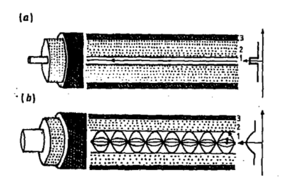
$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \left(n_0^2 - n_1^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

حيث λ هى طول موجة الضوء .

وفى الواقع العملى تكون قيم Δ أقل بكثير من الواحد الصحيح وغالبا ماتساوى ٠,٢ أو أقل .

والألياف البصرية عديدة المنوال هى موجهات للموجة التى تحتوى على عدة مناويل للانتشار ، وتكون لهذه المناويل أو النهج مجالات لها توزيع دورى ، وعند تجمعها تحصل على توزيع أى مجال مسموح به داخل الشعيرة ، ويبين الشكل رقم (٦/٣) مسار الموجات الضوئية فى هذه المناويل .

وتوجد ثلاث مناطق تمثل اللب والقشرة والسترة البلاستيك على الترتيب ، ويوضح الشكل (أ) شعيرة وحيدة المنوال بينما يوضح الشكل (ب) شعيرة متدرجة معامل الانكسار وعديدة المنوال .



شكل رقم (٦/٣) انتشار الموجات الضوئية فى (أ) شعيرة وحيدة المنوال ذات بروفيل معامل انكسار من درجة واحدة (ب) شعيرة متدرجة معامل الانكسار وعديدة المنوال .

٣/٣/٣- الخصائص التركيبية للألياف البصرية :

Compositional characteristics of optical fibres

تكون الألياف البصرية المستخدمة فى التراسل الضوئى - غالبا - من نوعين أولهما وحيد المنوال والآخر متدرج معامل انكسار لبها ومتعددة المنوال . وفى النوع الأخير يتكون

لب الشعيرة من زجاج السيليكا المشاب ببعض العناصر فيتغير معامل انكسار أكسيد السيليكون (n_0 = 1.450 at λ = 1.0 μm) بإشابته بمواد مثل أكاسيد الجرمانيوم والفوسفور والبورون - Rigterink, 1975 .

فالإشابه بالجرمانيوم . (MacChensey et al., 1974) أو الفوسفور -Payne and Gambling 1974 - ترفع قيمة معامل انكسار أكسيد السيليكون ، أما الإشابة بالبورون فتخفض هذه القيمة - French et al., 1973 .

وتوجه الألياف البصرية الموجات الضوئية إذا كانت مادة لبها ذات معامل انكسار أكبر من معامل انكسار مادة قشرتها - Marcuse, 1972 - لذلك فإن معظم الألياف البصرية تتكون من قشرة من أكسيد السيليكون النقى ولب ازداد معامل انكساره بإشابته بأكسيد الجرومانيوم أو الفوسفور أو فى بعض الألياف تشاب مادة القشرة بأكسيد البورون لتقلل معامل انكسار مادتها بالنسبة للبها غير المشاب .

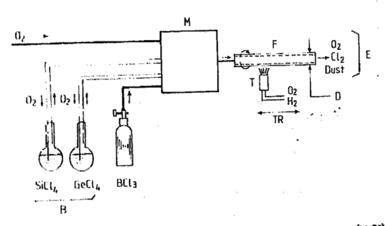
وتلعب مواد الإشابة دورا هاما ، حيث إنه بزيادة تركيز هذه المواد تزيد زاوية القبول acceptance angle للشعيرة وكذلك الاتساع العددى numerical aperture لها . ومن ناحية أخرى فإن زيادة مواد الإشابة تزيد من التغيرات فى تركيب المادة وينتج عن ذلك فقد (فى الضوء) عن طريق مسببات التشتت ، كما ينتج صعوبات تكنولوجية فى عملية تكوين الشعيرة نتيجة اختلاف فى الخواص الفيزيائية للب الشعيرة عن الخواص الفيزيائية للقشرة - Marcuse and Presby, 1980 - ويصل الفرق فى معاملات الانكسار بين اللب والقشرة فى الألياف المشابة بالجرمانيوم إلى ٠,٠٢ وتقوم صناعة الألياف البصرية ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة ، وكذلك متدرجة معامل الانكسار على أستخدام الطريقة الكيميائية المعدلة ، وذلك بترسيب الأبخرة MCVD - Mac Chensey et al., 1974

وفى عام (١٩٧٩) تم الحصول علي ألياف يصل فيها الفقد إلى ٠,٢ ديسيبل لكل كيلومتر 0.2 dB km^{-1} عند الطول الموجى λ = ١,٥٥ ميكرومتر - Miya et al., 1979 - وتتضمن طريقة الـ MCVD عمليتين : أولاهما : إنتاج قوالب (preform) ذات تركيب معين ، ويتكون من لب وقشرة لها مواصفات الشعيرة وبأقطار تتراوح بين ٠,٥ و ٣ سم وطول بضعة سنتيمترات ، ثم إنتاج الشعيرات عن طريق سحبها من هذه القوالب باستخدام فرن

كهربائى . ويكون قطر مقطع هذه القوالب هو حوالى ٧ ملليمتر أو يزيد ، بينما قطر الشعيرة يساوى ١٢٥ ± ١ ميكرومتر .

وحيث إننا بصدد دراسة الخواص التركيبية للألياف البصرية فمن المفيد إعطاء فكرة عن الطريقة الكيميائية المعدلة لتحضير هذه الألياف بترسيب الأبخرة MCVD - (شكل رقم ٧/٣) - وفى هذه الطريقة يتم تركيب أنبوبة من الكوارتز على مخرطة glass-working lathe تدار ببطء ، بينما تنساب المواد المتفاعلة (كلوريد السيليكون $SiCl_4$ ومواد الإشابة $GeCl_4$, BCl_4) يحملها تيار من الأكسجين . ويستخدم لهب الأوكسى هيدروجين لترسيب وصهر طبقات المواد فى نفس الوقت ، وذلك بتحريكه على امتداد الأنبوبة الخارجية ، وتترسب حوالى خمسين طبقة بتكرار إمرار اللهب .

ولتحضير ألياف بصرية ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة يثبت تركيز مادة الإشابة لكل الطبقات المرسبة ، بينما فى حالة الألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار فيزاد تركيز مواد الإشابة مع زيادة عدد الطبقات ، وتؤدي إلى انخفاض قيمة معامل الانكسار مع زيادة البعد عن المحور . وفى نهاية العملية ترفع درجة حرارة اللهب فيحدث انصهار للأنبوبة collapse ونحصل على القوالب الجامدة . وتسحب الألياف من القوالب فى المرحلة الأخيرة .



شكل رقم (٧/٣) : رسم تخطيطى يوضح عملية التحضير بالطريقة الكيميائية المعدلة بترسيب الأبخرة (MCVD) ، حيث F أنبوبة من الكوارتز المنصهر ، D طبقة مرسبة من الزجاج ، M مقاييس توضح انسياب الغازات flow meters ، B دورقان ، T موقد ، TR اتجاه حركة الموقد .

ولاختبار تركيب الطبقات المكونة للقالب استخدم "Marcuse and Presby" (١٩٨٠) الميكروسكوب الألكترونى الماسح لفحص نهاية الشعيرة بعمل نحر (تآكل) etching لها ، وكانت نتيجة هذا الفحص احتفاظ الشعيرة بنفس التركيب الطبقى لها ، وأفاد المؤلفان بأن سمك كل طبقة فى حالة الألياف التى فحصت أقل من طول الموجة ، وبالإضافة إلى أن قيمة معامل الانكسار غير ثابتة فى كل طبقة من الطبقات .

وكذلك درست الخواص التركيبية للقوالب والألياف البصرية المحضرة بالطريقة الكيميائية المعدلة بترسيب الأبخرة Presby et al., 1975-MCVD - وذلك بطريقة التداخل الضوئى باستخدام شريحة على شكل قرص من الشعيرة interferometric slab method التى سيرد شرحها فى الباب الخامس – وباستخدام الميكروسكوب الألكترونى الماسح .

وقد افاد المؤلفون أن التركيب الناتج من عملية الترسيب يوجد فى جميع العمليات المتتابعة ويظهر فى الشعيرة بالإضافة إلى وجود انخفاض فى معامل الانكسار عند مركز الشعيرة central dip . ويرجع الاحتفاظ بنفس بروفيل معامل الانكسار فى الشعيرة التى سحبت من القالب ببروفيل معامل الانكسار القوالب ، وذلك نتيجة أن معامل الانكسار يزداد تبعا لدالة خطية مع تركيز مواد الإشابة فى القالب وبنفس الطريقة .

كما درست شريحة عرضية من القالب preform ذات سمك يساوى حوالى ١٠ ملليمتر باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى ، وحضرت عينات مماثلة من الشعيرات للفحص باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى والميكروسكوب الألكترونى الماسح(Burrus and Standly, 1974) ، ونتج عن هذه الدراسة وجود التركيب الطبقى فى القالب preform الذى أمكن الاستدلال عليه عند استخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى والألكترونى الماسح .

وأظهرت هدب التداخل الثنائى لشريحة من قالب الشعيرة- Presby et al., 1975 - preform هدب التداخل الضوئى على هيئة خطوط مستقيمة ومتوازية فى قشرة الشعيرة التى هى من مادة السيليكا النقية المصهورة ، مما يؤكد تجانس مادتها ، يلى ذلك طبقة من البوروسيليكات معامل انكسار مادتها أقل من معامل انكسار مادة القشرة . وتمنع هذه الطبقة وصول أية مواد غريبة إلى لب الشعيرة وانتشارها . ويتم ترسيب مادة لب الشعيرة

بزيادة معدل سريان كلوريد الجرومانيوم $Ge\ Cl_4$ الذى ينتج عنه ازدياد محتوى أكسيد الجرمانيوم $Ge\ O_2$ ، ومن ثم زيادة فى معامل الانكسار طرديا مع زيادة سمك المادة المشابة .

ولقد قام presby ومجموعته بزيادة عدد مرات ترسيب كلوريد الجرمانيوم $Ge\ Cl_4$ إلى ١١ مرة ينتج عنها بروفيل معامل انكسار لب الشعيرة يتبع مسار قطع مكافئ اعتبارا من القشرة حتى مركز الشعيرة . وأوضحت خريطة صور التداخل الضوئى التركيب الطبقى داخل لب الشعيرة الناتج من كل رحلة ترسيب . وكانت نتيجة قياس الفرق فى معامل انكسار مادة القشرة وأعلى قيمة لمعامل انكسار لب الشعيرة عند محورها يعطى قيمة Δ n تساوى ٠,٠١٦ . كما أفاد المؤلف أن قدرة ميكروسكوب التداخل الضوئى على فصل المعالم الدقيقة لم تكن كافية لتحديد طبقات لب الشعيرة كلا على حدة . ولقد استخدم المؤلف ميكروسكوب ألكترونى ماسح لتحديد هذه الطبقات .

جدير بالذكر أن بركات ومجموعته - Barakat et al., 1988 - باستخدام هدب التداخل الضوئى المتعدد أمكن أن يحددوا طبقات لب الشعيرة متدرجة معامل الانكسار ويعينوا سمك كل طبقة ومعامل انكسار مادتها . مما يوضح قدرة هدب التداخل الضوئى المتعدد على تحديد المعالم التركيبية الدقيقة بالمقارنة بهدب التداخل الضوئى الثنائى – ويبين الشكل (٨/٣) صورة هدب التداخل الضوئى موضحا بها التركيب الطبقى للب الشعيرة – ووجد أن الشعيرة تتركب من طبقات متعاقبة لها معاملات انكسار متزايدة بشكل تدريجى ، حيث n (r) تظل قيمتها ثابتة لسمك الطبقة Δr ، ولكنها تتبع العلاقة المعروفة التى تربط n (r) مع المسافة من مركز لب الشعيرة r

$$n(r) = n_0\left[1 - 2\Delta\left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha}\right]^{1/2} \qquad 0 \le r \le a \qquad (3.1)$$

حيث a نصف قطر لب الشعيرة .

وكذلك فإن Δ تعطيها المعادلة :

$$\Delta = (n^2(o) - n^2(a)) / 2n^2(o)$$

و α هو بارامتر يحدد شكل بروفيل معامل الانكسار .

وقد تم دراسة هذا البروفيل فى الألياف متدرجة معامل الانكسار GRIN نظريا وأكدت النتائج تجريبيا من صور التداخل الضوئى . وقسم نصف قطر لب الشعيرة إلى طبقات أو مناطق عددها m وعرض كل منها Δr وتمثل r_m نصف قطر الطبقة m

$$0 = r_0 < r_1 < r_2 \ldots < r_{m-1} < r_m = a$$

$$(r_m - r_{m-1}) = \frac{a}{m} = \Delta r = \text{constant.}$$

ويتبع معامل الانكسار العلاقة :

$$n(o) = n_{ro} > n_{r1} > \ldots\ldots > n_{rm} = n_a = n_{clad}$$

وكذلك فإن :

$$n(r) = f(r)$$

هى المعادلة الأساسية للب الشعيرة فى الألياف الـ GRIN .

ويمكن استنتاج قيم r_m لجميع قيم m من المعادلة (٣-١) وقيمة إزاحة الهدبة الناتجة من عدة طبقات m المكونة للب الشعيرة ، بالإضافة إلى قشرة الشعيرة يعطى بالتجميع summation ، وتشارك كل طبقة بنصف قطع ناقص الطول النصفى لمحوريه الأساسيين semi-principal axis هما :

$$\left\{ r_f, \ \frac{4\,\Delta Z}{\lambda}\left(n_{clad} - n_L\right) r_f \right\}, \left\{ a, \frac{4\,\Delta Z}{\lambda}\left(n_{r_{m\text{-}1}} - n_{clad}\right) a \right\},$$

$$\left\{ r_{m-1}, \frac{4\,\Delta Z}{\lambda}\left(n_{r_{m-2}} - n_{r_{m-1}}\right) r_{m-1} \right\}, \ldots$$

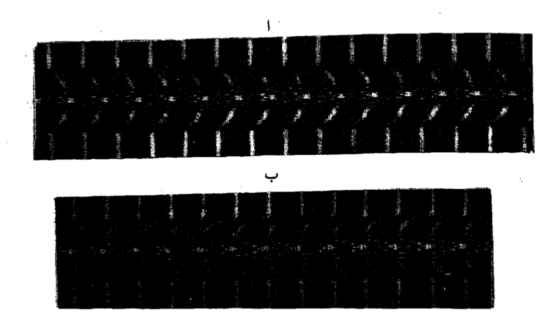
كما هو موضح فى الفصل السادس .

والشكل (٣/٨/أ) يبين صورة التداخل الضوئى المتعدد لشعيرة من الألياف الـ GRIN سمكها $t_f = 125 \pm 1\ \mu m$. وتظهر الهدب على شكل خطوط مستقيمة ومتوازية وهى توازى حافة الإسفين الضوئى wedge المكون من مسطحين ضوئيين مفضضين يميل

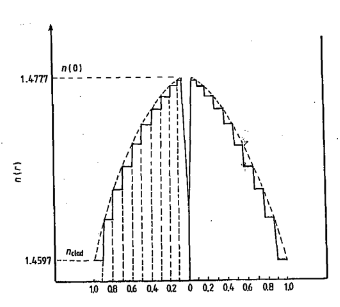
أحدهما على الآخر ، ويحصران بينهما سائلا غمرت فيه الشعيرة ، وكانت المسافة بين كل هدبتين متتاليتين هي ΔZ . وعندما تعبر الهدبة السطح الفاصل بين السائل وقشرة الشعيرة تتبع مسارا على شكل جزء من قطع ناقص (ماعدا حالة تساوى معامل انكسار السائل مع معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة $n_L = n_{clad}$ حيث تستمر الهدبة في نفس الاتجاه) . وعندما تعبر الهدبة منطقة لب الشعيرة فإنها تظهر مراحل متقطعة discontinuities ومتتابعة ، وينتج ذلك عن التغير المفاجئ في بروفيل معامل الانكسار للطبقات المتتابعة المحتوية على نسب معينة من مواد الإشابة ، ويلاحظ أن هذا التقطع في الهدب يوجد فقط في منطقة لب الشعيرة ولجميع رتب التداخل الضوئى التى تظهر خلال هذا اللب وعلى طول الشعيرة . ويظهر هذا التأثير باستخدام سوائل لها معاملات انكسار n_L مختلفة (شكل ٣/٨/ب) ، وتسمح هدب التداخل الضوئى فى المستوى X,Z– حيث تتكون الهدب – بحساب كل من $\Delta n, \alpha$ بطريقة الـ - Barakat et al., (1985) invariance- ويوضح الشكل (٣/٩) بروفيل معامل الانكسار متعدد الدرجات . ويحدد امتداد كل طبقة من صورة التداخل الضوئى فى المستوى (X,Z) بإسقاط جزء الهدبة على المحور X ، ووجد أن :

$$r_m - r_{m-1} = \Delta r = 0.1a = 2.5\ \mu m$$

ونصف قطر لب الشعيرة (a) يساوى ٢٥ ميكرومتر $(n_{r_{m-1}} - n_{r_m}), m = 10$ ، تقل نحو المركز فى درجات كل منها يساوى ٠,٠٠٢٠ .



شكل رقم (٨/٣) : خريطة هدب التداخل الضوئى المتعدد وفيه تم فصل وتحديد الطبقات المكونة للب الشعيرة للشعيرات متدرجة معامل انكسار لبها وكان سمك الشعيرة r_f مساويا ١٢٥ ميكرون ، ونصف قطر لبها ٢٥ ميكرون ، ومعامل انكسار قشرتها ١,٤٥٩٧ عند طول موجى ٥٤٦١ أنجستروم ، معامل انكسار سائل الغمر n_L = ١,٤٦٢٣ الصورة (أ) ، ١,٤٥٨٨ الصورة (ب) .



شكل رقم (٩/٣) : يوضح بروفيل لب الشعيرة متدرجة معامل الانكسار ويظهر فيها الشكل الهرمى المتدرج وكذلك انخفاض معامل الانكسار عند مركز الشعيرة ، Δn = ٠,٠١٨ .

References

Barakat N and El-Hennawi H A 1971 Textile Res. *J.* **41** 391

Barakat N, El Hennawi H A and El-Diasti F 1988 Appl. Opt. **27** 5090

Barakat N, Hamza A A and Goneid A S 1985 Appl. Opt. **24** 4383

Barakat N and Hindeleh A M 1964 Textile Res. J **34** 581

Bunn C W 1949 The optical properties of fibres in "Fibre Science" ed. J M Preston (Manchester : The Textile Institute) pp 144-57

——————1961 Chemical Crystallography - An Introduction to Optical and X-Ray Methods (Oxford : Oxford University Press) pp 304-22

Bunn C W and Daubeny P 1954 Trans. Faraday Soc. **50** 1173

Burrus C A , Chinnock E L, Gloge D, Holden W S, Tingue Li, Standley R D and Keck D B 1973 Proc. IEEE **61** 1498

Burrus C A and Standley R D 1974 Appl. Opt. **13** 2365

Carter G B and Schenk V T J 1975 Ultra-high modulus organic fibres in "Structure and Properties of Oriented Polymers" ed. I M Ward Ch. 13 (London : Applied Science) pp 454-92

Costa B 1980 The optical fibre in "Optical Fibre Communication", Technical Staff of CSELT (New York : McGraw-Hill) pp 1-46

Denbigh K G 1940 Trans. Faraday Soc. **36** 936

Dobb M G and McIntyre J E 1984 Adv. Polym. Sci. **60/61** 61

Faust R C 1952 Proc. Phys. Soc. **B65** 48

Françon M 1961 Progress in Microscopy (Oxford : Pergamon)

French W G, Pearson A D, Tasker G W and MacChesney J B 1973 Appl. Phys. Lett. **23** 338

Hamza A A and Kabeel M A 1986 J. Phys. D : Appl. Phys. **19** 1175

Hamza A A and Sikorski J 1978 J. Microsc. **113** 15

Hamza A A, Sokkar T Z N and Kabeel M A 1985 a J. Phys. D: Appl. Phys. **18** 1773

—————— 1985b J. Phys. D: Appl. Phys **18** 2321

Hartshorne N H and Stuart A 1970 Crystals and the Polarizing Microscope (London : Edward Arnold) pp 556-88

Keller A 1968 Rep. Prog. Phys. **31** 623

Kita H, Kitano I, Uchida T and Furukawa M 1971 J. Am. Ceramic Soc. **54** 321

Kuhn W and Grün F 1942 Kolloidzchr. **101** 248

MacChesney J B O, Connor P B and Presby H M 1974 Proc. IEEE **62** 1280

Marcuse D 1972 Light Transmission Optics (New York : Van Nostrand Reinhold)

Marcuse D and Presby H M 1980 Proc. IEEE **68** 668

Meredith R and Hearle J W S 1959 Physical Methods of Investigating Textiles (New York : Interscience).

Miya T, Terunuma Y, Hosaka T and Miyashita T 1979 Electron. Lett. **15** 106

Northolt M G 1974 Europ. Polym. J. **10** 799

Payne D N and Gambling W A 1974 Electron. Lett. **10** 289

Presby H M, Standley R D, MacChesney J B and O'Connor P B 1975 Bell Syst. Tech. J. **54** 1681

Preston J M 1933 Trans. Faraday Soc. **29** 65

Rigterink M D 1975 Tech. Dig. Topical Meet. Optical Fibre Transmission Jan. 7-9, Williamsburg, VA

Stoves J L 1957 Fibre Microscopy (London : National Trade Press)

Wells O C 1974 Scanning Electron Microscopy (New York : McGraw-Hill).

الفصل الرابع
أساسيات التداخل الضوئي
Principles of Interferometry

٤/١- مقدمة :

سوف نتناول هنا حالة التغير فى السعة وفى الطور للموجات عند نقطتين P_2, P_1 فى مجال موجى wavefield نتجت عن مصدر ضوئى ممتد ينبعث عنه أطوال موجية ليست متساوية تماما إنما تتمركز حول طول موجى واحد extended quasi-monochromatic source ، ونفترض أن هذا المجال الموجى موجود فى الفراغ ، وأن P_2, P_1 تبعدان عن بعضهما بمسافة تساوى عدة أطوال موجية . فإذا كانت النقطتان P_2, P_1 قريبتين من بعضهما فإن التغيرات فى سعة الموجات عند هذه النقط وكذلك التغيرات فى الطور ترتبط كل منها بالأخرى . ومن المنطقى أن نفترض أن النقطتين P_2, P_1 قريبتان من بعضهما إلى الحد الذى يكون فيه الفرق فى المسار (PD) من النقطة S حيث $(PD = SP_1 - SP_2)$ يكون صغيرا بالمقارنة بالطول الموجى المتوسط $\bar{\lambda}$، وتكون التغيرات عند P_2, P_1 متساوية عمليا . وكذلك يوجد علاقة بين هذه التغيرات حتى فى الحالة التى تكون النقطتان P_2, P_1 منفصلتين بمسافة أكبر ، بشرط أن يكون فرق المسار PD لجميع النقط الموجودة على المصدر الضوئى لايزيد عن طول الترابط Coherent length l_c .

$$l_c = C\,\Delta t = \frac{C}{\Delta \upsilon}$$

لكن:

$$\frac{\Delta \upsilon}{\upsilon} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}$$

$$\Delta \upsilon = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}\,\upsilon = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \cdot \frac{C}{\lambda} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda^2}\,.C$$

$$I_c = \frac{(\bar{\lambda})^2}{\Delta \lambda}$$

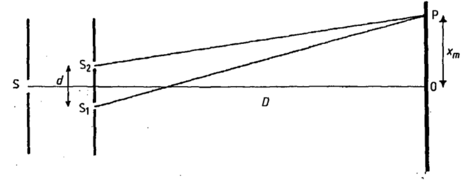
حيث Δt زمن الترابط ، $\Delta \upsilon$ اتساع خط الطيف بوحدات التردد .

وبذلك نصل إلى مفهوم منطقة الترابط region of coherence حول أى نقطة P فى المجال الموجى .

وحتى نستطيع أن نجد وصفا مناسبا لمجال موجى نتج عن مصدر ضوئى محدود ينبعث عنه أطوال موجية متعددة ، فإنه من المرغوب فيه إدخال مقياس للارتباط المتبادل الذى يوجد بين الذبذبات عند النقط المختلفة P_2, P_1 فى المجال . ولابد أن نتوقع أن هذا المقياس يرتبط ارتباطا وثيقا بحدة هدب التداخل الضوئى التى تحدث عند التقاء الذبذبات الناتجة من نقطتين . وأن نتوقع كذلك تكون هدب تداخل ضوئى حادة عندما يكون الارتباط المتبادل بينهما كبيرا . مثال ذلك : عندما يخرج الضوء عند P_2, P_1 من مصدر ضوئى صغير جدا له مدى طيفى محدود ، ونتوقع عدم تكون هدب تداخل ضوئى فى غياب هذا الارتباط المتبادل بين النقطتين ، ومثال ذلك : عندما تستقبل P_2, P_1 ضوء من مصدرين مختلفين .

٤/٢– تقسيم جبهة الموجة : Division of wavefront

توجد عدة طرق لتقسيم جبهة الموجة إلى جزئين وإعادة اتحادهما عند زاوية صغيرة . ومن أمثلة ذلك : تكوين هدب التداخل الضوئى فى تجربة الشق المزدوج ليونج Young's experiment ومرآة فرنل Fresnel mirror ومنشور فرنل الثنائى Fresnel biprism، وفى جميع هذه الحالات يتبع الشعاعان المنبعثان من نفس المصدر مسارين مختلفين ، يختلف طول أحدهما عن الآخر ، ويسمح لهما بالالتقاء مرة أخرى (شكل رقم ١/٤) .



شكل رقم (١/٤) : تجربة الشق المزدوج ليونج . S مصدر ضوئى وحيد الطول الموجى .

ونحصل على فرق الطور δ بين شعاعين من المعادلة :

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{(Path difference)}$$

ويكون فرق المسار مساويا $m\lambda$ عند $(\delta = 2m\pi)$ حيث m تساوى صفرا ، ١، ٢ ، ٣، ....

وتتكون هدب تداخل ضوئى مضيئة ، وتظهر على الحائل (شكل رقم ٤/١) على مسافة X_m من النقطة O إذ :

$$X_m = m\lambda \, D/d$$

حيث d هى المسافة بين الفتحتين S_1, S_2, D هى المسافة بين الحائل وهاتين الفتحتين.

وفى كل مقاييس التداخل الضوئى المذكورة سابقا يتبع توزيع الشدة الضوئية قانون مربع جيب التمام cosine square law ، وتكون الهدب على مسافات متساوية من بعضها وهى هدب لايقتصر تكونها على مستوى واحد فى الفراغ أى تتكون فى أى مستوى أمام الفتحتين وينص قانون مربع جيب التمام على الآتى :

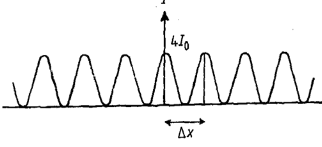
$$I = 4 I_0 \cos^2 \delta/2$$

حيث I_0 هى شدة كل من الموجتين . ويوضح الشكل رقم (٤/٢) توزيع الشدة الضوئية الناتجة من التداخل الضوئى الثنائى .

وتتكون هدب التداخل الضوئى المعتمة عند :

$$X = (m + \frac{1}{2})\lambda \, D/d$$

والمسافة بين كل هدبتين مضيئتين أو معتمتين متتاليتين (Δx) كما هو موضح فى الشكل رقم (٤/٢) .

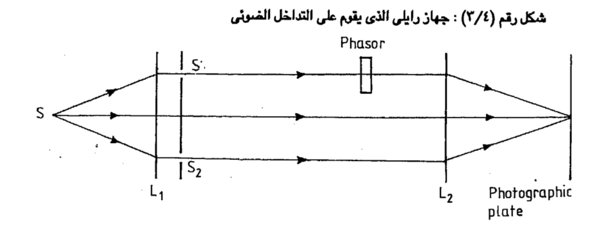


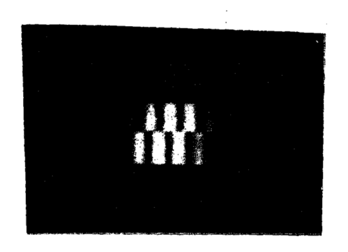
شكل رقم (٤/٢) : توزيع الشدة الضوئية فى حالة هدب التداخل الضوئى الثنائى .

وتنقص درجة تباين هدب التداخل الضوئى visibility of fringes بزيادة فرق المسار الضوئى ، حيث إن المصدر لايمكن أن يكون أحادى طول الموجة تماما . وتختفى درجة التباين visibility عند رتب التداخل الضوئى التالية بعيدا عند النقطة O (شكل رقم ١/٤) عندما يزيد فرق المسار الضوئى عن طول الترابط coherent length لهذا المصدر الضوئى .

ويوجد مثال آخر لهدب التداخل الضوئى الناتجة من تقسيم جبهة الموجة وذلك فى جهاز رالى Rayleigh's refractometer حيث ينقسم الضوء الصادر من مصدر ضوئى خطى linear source وتتكون حزمة متوازية من الأشعة بواسطة العدسة L_1 وتنقسم جبهة الموجة عند مرورها بفتحتين S_2, S_1 بينهما مسافة ، ويتبع الشعاعان مسارين متساويين تماما ، ولكن أحد هذين الشعاعين يمر فى وسط phasor وينتج عن ذلك حدوث فرق فى الطور بين الشعاعين ، وتتكون هدب تداخل ضوئى على شكل خطوط مستقيمة فى المستوى البؤرى للعدسة L_2 كما هو موضح فى الشكل رقم (٣/٤) . ولتحديد مركز هذا النظام يستخدم مصدر ضوئى أبيض white light source للحصول على الهدبة الصفرية zero order fringe وتظهر المجموعتان وتسجلان ، وفى نفس الوقت يغطى كلٌ منهما نصف مجال الرؤية ، كما هو موضح فى الشكل رقم (٤/٤) .

شكل رقم (٣/٤) : جهاز رايلى الذى يقوم على التداخل الضوئى





شكل رقم (٤/٤) : هدبة التداخل ذات الرتبة الصفرية (لتفسير تكونها يرجع إلى الأساس النظرى)

٣/٤ تقسيم السعة : Division of amplitude

لطريقة التداخل الضوئى بتقسيم السعة نفس الأهمية التى لطريقة تقسيم جبهة الموجة وذلك فى التطبيقات العملية . وعندما يسقط شعاع من الضوء على شريحة رقيقة معامل انكسار مادتها n وسطحاها متوازيان وموضوعة فى الهواء ، فإن جزءا من سعة الموجة الساقطة ينعكس عند السطح الأول أى هواء / شريحة ، وينفذ الجزء الباقى خلال الشريحة بعد انكساره ليقابل السطح الآخر للشريحة ، كما هو موضح فى الشكل رقم (٤-٥) . وعند النقطة B يحدث انعكاس عند السطح الفاصل شريحة / هواء ، وينفذ جزء من الضوء على امتداد الشعاع BE . ويمر جزء آخر خلال الشريحة ليصل إلى السطح العلوى حيث يحدث انعكاس عند السطح الفاصل شريحة / هواء ، وينفذ جزء عند النقطة C . ويترك الشعاعان السطح العلوى عند النقطتين C, A متوازيين ، وعند تجميعهما عند المستوى البؤرى لعدسة تنتج هدب تداخل ضوئى بالانعكاس حيث إنهما مترابطان . وكذلك فإن الشعاعين اللذين يتركان السطح السفلى عند النقطتين D, B يمكن تجميعهما عند المستوى البؤرى لعدسة لتكوين هدب تداخل ضوئى ثنائى عند النفاذ ، حيث إنهما أيضا مترابطان .

افرض أننا حسبنا فرق المسار الضوئى بين الشعاعين النافذين المتجمعين فى المستوى البؤرى للعدسة . فعندما يصل الشعاع المنكسر إلى النقطة B ينقسم إلي جزئين ، أحدهما يمر فى الاتجاه $\overrightarrow{BE}$ والآخر يأخذ المسار $\overrightarrow{BCD}$ ، وحيث إن الموجة تصل إلى النقطة D فإن الشعاع الآخر $\overrightarrow{BE}$ يصل إلى النقطة 'D حيث :

$$BD' = nBC + n\,CD$$

وهذان الشعاعان كانا فى البداية متحدين فى الطور وينبعان من النقطة B . وباستخدام عدسة يمكن تجميع هذين الشعاعين بطور كل منهما فى المستوى البؤرى لهذه العدسة . وبالتالى فإننا نعنى بفرق الطور عند النقطتين E,D . وحيث إن الموجتين عند D', D لهما نفس الطور ، فإن فرق الطور بين الموجتين عند النقطتين E, D تعطيه المعادلة الآتية ، كما يتضح من الشكل رقم (٤/٥) :

$$\frac{2\pi}{\lambda} ED' = \frac{2\pi}{\lambda}\left(nBC + nCD - BE\right) = \frac{2\pi}{\lambda}\, 2nt\cos r$$

وفى حالة هدبة مضيئة فى نظام التداخل الضوئى عند النفاذ يكون :

$$\frac{2\pi}{\lambda}\, 2nt\cos r = 2\, m\pi$$

$$m\lambda = 2nt\cos r$$

حيث m هى رتبة التداخل الضوئى .

وحيث إنه فى نظام التداخل الضوئى عند الانعكاس يحدث تغير فى الطور مقداره (π) درجة عند الانعكاس من السطح الفاصل هواء / شريحة ، فإن الشعاع المنعكس عند A يعانى تغيرا فى الطور مقداره π بالنسبة للشعاع النافذ إلي B والمنعكس عندها شريحة / هواء (film / air) .

ويكون شرط تكون هدبة مضيئة عند الانعكاس هو :

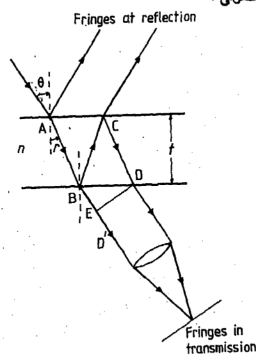
$$\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = 2nt\cos r.$$

ويكون التغير فى الطور عند الانعكاس عند السطح الفاصل شريحة / هواء مساويا للصفر . وبإضاءة هذه الشريحة بضوء أحادى طول الموجة تتكون هدب تداخل ضوئى ذات رتب متتابعة عندما يكون سمك الشريحة t ثابتا ولكن بتغير زاوية السقوط Θ . وهذه الهدب متساوية فى قيم الزاوية Θ أى هدب متساوية الميل fringes of equal inclination ، وهى محددة الموقع وتتكون فى مستوى فى مالانهاية ، ويمكن تجميعها فى المستوى البؤرى لعدسة

، كما هو موضح فى الشكل رقم (٥/٤) . وعندما تكون Θ ثابتة فلابد من تغير قيمة t للحصول على هدب تداخل ضوئى متتابعة الرتبة . وتسمى هذه الهدب بهدب تساوى السمك fringes of equal thickness ، وهى محددة الموقع فى الفراغ بالقرب من مقياس التداخل . وفى حالة إسفين ضوئى هوائى air wedge مضاء بحزمة متوازية من الأشعة أحادية طول الموجة وبزاوية سقوط مقدارها Θ تتكون هدب تداخل ضوئى على هيئة خطوط مستقيمة توازى حافة الإسفين الضوئى . وفى حالة السقوط العمودى تتكون الهدب فى مستوى محدد الموقع وقريب جدا من الإسفين الضوئى .

وبصورة عامة تكون الهدب متساوية (nt) إذا كانت n تعتمد على الموقع وهى الهدب متساوية السمك البصرى fringes of equal optical thickness .

ويوجد مثال آخر على هدب التداخل الضوئى الناتجة من تقسيم السعة وذلك في مقياس التداخل الضوئى لميكسون Michelson interferometer . وفيه يتداخل شعاعان نتجا من تقسيم السعة بعد أن ينعكسا على مرآتين مستويتين ليأخذا فى النهاية نفس المسار ليلتقيا وتتكون هدب التداخل الضوئى .



شكل رقم (٥/٤) : هدب التداخل المتكونة عند النفاذ وعند الانعكاس الناتجة من تقسيم السعة .

٤/٤- تداخل الضوء المستقطب فى مستوى : Interference of plane polarised light

اكتشف " Fresnel and Arago " – انظر Tolansky, 1973 - بالتجربة القواعد المطلوبة لحزمتين ضوئيتين مستقطبتين لكى تعطى هدب تداخل وهذه القواعد هى :

أ- لايمكن أن نحصل على هدب تداخل ضوئى من شعاعين من الضوء مستقطبين فى مستويين متعامدين على بعضهما .

ب- يمكن أن نحصل على هدب تداخل ضوئي من شعاعين من الضوء مستقطبين فى مستويين متوازيين .

جـ- تتداخل حزمتان ضوئيتان مستقطبتان فى نفس المستوى إذا انبعثتا من نفس المصدر ، أى أنهما مترابطتان coherent .

سنتناول هنا حالات مبسطة لها علاقة بهذا الموضوع . والحالة الأولى هى حالة شريحة ذات مسطحين متوازيين من (١) مادة أحادية المحور uniaxial material و (٢) مادة ثنائية المحور biaxial material والحالة الثانية هى حالة الألياف الطبيعية والتركيبية التى لها انكسار مزدوج birefringence .

وينتج من القاعدة (ب) أن الأشعة المتعددة المستقطبة وذات الذبذبات فى نفس المستوى يمكن أن تتداخل لتعطى هدب تداخل ضوئى متعدد .

٤/٤/١- حالة بلورة أحادية المحور قطعت عمودية على المحور البصرى :

The case of a uniaxial crystal cut perpendicular to the optic axis :

إذا سقط شعاع على بلورة أحادية المحور ، فإنه يخرج منها منفصلا إلى شعاعين مستقطبين متعامدين – ماعدا حالة الشعاع الذى يمر على امتداد محور البلورة – :

أولا : الشعاع المعتاد أو المألوف ordinary ray ، وفيه تتذبذب مركبة المتجه الكهربى electric vector عموديا على مستوى السقوط plane of incidence، ويكون معامل انكساره n_o ثابتا ولايعتمد على اتجاه الانتشار .

ثانيا : الشعاع الشاذ أو غير المألوف extra ordinary ray ، وفيه تتذبذب مركبة المتجة الكهربى فى مستوى سقوط الضوء ، ويتغير معامل الانكسار n'_e مع زاوية السقوط ، ويحتفظ معامل الانكسار بقيمة محددة n_e للضوء الساقط عموديا على المحور البصرى التى تعطيها المعادلة الآتية لاية زاوية انكسار r_e

$$\frac{1}{n_e^{'2}} = \frac{\cos^2 r_e}{n_0^2} + \frac{\sin^2 r_e}{n_e^2}.$$

وتعطى الأشعة المنعكسة المتعددة والناتجة من كل من الشعاعين المنكسرين مجموعة هدب تداخل ضوئى ، وإذا كانت δ_2, δ_1 هما فرق المسار فى الحالتين فإن :

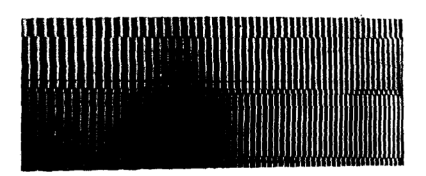
$$\delta_1 = 2n_0 t \cos r_0$$

$$\delta_2 = 2n'_e t \cos r_e$$

وذلك بإهمال الانحراف فى المعادلة الأساسية .

وعند مركز كل من النظامين أى أنه فى حالة Θ = صفر ، $(n_e' = n_O)$ لايحدث انفصال بين المكونين الذين لهما نفس رتبة التداخل والذين ينتميان لكل من النظامين . وبزيادة الزاوية Θ نجد أن قيمة n_e' تبتعد بانتظام عن n_O ، ويحدث الانفصال عند قيمة مضيئة لزاوية مقدارها Θ .

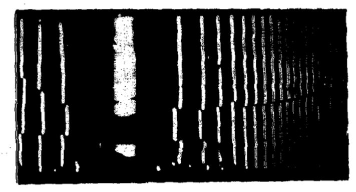
وتتكون هدب التداخل الضوئى بسهولة باستخدام شريحة رقيقة تم انفلاقها حديثا من نوع جيد من فولوجوبايت الميكا ، وتفضض الميكا بتغطية كل من سطحيها بطبقة رقيقة من الفضة انعكاسيتها R تساوى ٨٠٪ وذلك بالتبخير الحرارى . ويتم الحصول على هدب تساوى الرتبة اللونية – انظر Tolanskly, 1948 – الموضحة بالشكل رقم (٦/٤) ، باستخدام مطياف الانحراف الثابت . ونلاحظ عدم وجود ازدواجية لهدب التداخل التى تنتج عن الانكسار المزدوج ، يؤكد ذلك أن عينة ميكا الفولوجوبايت يمكن أن تعتبر بلورة أحادية المحور uniaxial crystal.



شكل رقم (٤/٦) هدب تساوى الرتبة اللونية الناتجة من شريحة من بللورة أحادية المحور

هدب تداخل تساوى المماس :

يتم تشكيل العينة بثنيها لكى تصبح على شكل نصف إسطوانة ، ويسقط عليها حزمة متوازية من الضوء أحادى طول الموجة ، وتتكون هدب على شكل خطوط مستقيمة توازى محور هذه الإسطوانة على لوح حساس موضوع عموديا على محور الإسطوانة مارا بالمركز o . ونلاحظ هنا أن زوايا سقوط الأشعة المتوازية تتغير من صفر درجة عند المركز إلى زاوية تقارب ٩٠° ، وهذه هى هدب تساوى ميل المماس fringes of equal tangential inclination. Tolansky and Barakat, 1950 . والشكل رقم (٤/٧) يوضح الهدب الناتجة .



شكل رقم (٤/٧) : هدب تساوى ميل المماس الناتجة من شريحة بللورة أحادية المحور

وبوضع منشور نيكول Nicol prism فى مسار الشعاع الساقط يمكن إثبات أن مجموعتين من الهدب تتذبذبان فى مستويين متعامدين ، وتتكون المجموعة الخارجية بالشعاع

الذي يتذبذب متجهة الكهربى عموديا على مستوى السقوط أى الشعاع المعتاد ، وذلك لأن ميكا الفولوجوبايت عبارة عن بلورة سالبة negative crystal أى أن :

$$n_o > n_e \quad \text{(Barakat, 1958)}$$

٢/٤/٤- حالة بلورة ثنائية المحور قطعت عمودية على اتجاه منصف الزاوية الحادة بين المحورين

The case of a biaxial crystal cut perpendicular to the acute bisectrix :

حيث إن أى شعاع يسقط على بلورة ينفصل عادة إلى شعاعين مستقطبين فى مستويين متعامدين وينتشران بسرعتين مختلفتين قليلا عن بعضهما وفى اتجاهين مختلفين أيضا ، فإن الأشعة المتعددة والمتكونة نتيجة انعكاس كل من الشعاعين تكون مجموعتين من هدب التداخل الضوئى. وبفرض ان δ_2, δ_1 هما فرق المسار الضوئى فى حالة النظامين ينتج أن :

$$\delta_1 = 2n^{\perp} t \cos r'$$

$$\delta_2 = 2n^{\parallel} t \cos r''$$

حيث :

$$\sin \Theta = n^{\perp} \sin r' = n^{\parallel} \sin r''$$

$n^{\perp}, n^{\parallel}$ هما معاملا الانكسار فى حالة الشعاعين وعند زاوية سقوط معينة Θ .

افرض أننا أخذنا فى الاعتبار المستوى المحتوى على المحور البصرى ، فإن قطاع سطح الموجة بهذا المستوى يتكون من دائرة نصف قطرها n_m وقطع ناقص محوراه هما n_p , n_g ، وللقطاع الدائرى :

$$\delta_1 = 2n_m t \cos r$$

وكذلك :

$$\delta_1^2 = 4t^2 \left(n_m^2 - \sin^2 \Theta\right) \qquad (4.1)$$

وللقطاع على هيئة قطع ناقص :

$$\frac{1}{n^2}=\frac{\cos^2 r}{n_g^2}+\frac{\sin^2 r}{n_p^2}$$

ولذلك فإن :

$$n^2 = n_g^2 - \sin^2\Theta\left(\frac{n_g^2}{n_p^2} - 1\right) \qquad (4.2)$$

وكذلك

$$\delta_2^2 = 4t^2\left(n_g^2 - \frac{n_g^2}{n_p^2}\sin^2\Theta\right) \qquad (4.3)$$

وبذلك تتكون مجموعتان من هدب التداخل الضوئى لايعتمد إحداهما على الأخرى ، مستقطبين فى اتجاهين متعامدين . تتبع المجموعة الأولى المعادلة رقم (١/٤) وهى ذات معامل انكسار n_m ثابت القيمة ، وتتذبذب عموديا فى مستوى السقوط . وتتبع المجموعة الثانية المعادلتين رقم (٢/٤) ، (٣/٤) بمعامل انكسار n متغير مع زاوية Θ كما هو فى المعادلة رقم (٢/٤) ومعامل الانكسار n يساوى n_g عندما تكون Θ = صفر حيث :

$$n_g > n_m > n_p$$

وبزيادة Θ تقل قيمة n وتأخذ القيمة n_m

عند زاوية سقوط تساوى القيمة الظاهرية لزاوية المحور الضوئى E التى تحقق المعادلة الآتية :

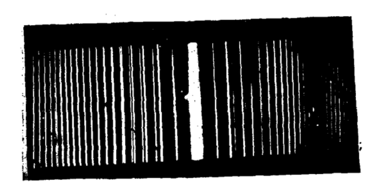
$$\sin E = n_p\left(\frac{n_g^2 - n_m^2}{n_g^2 - n_p^2}\right)^{1/2}$$

وتستمر قيمتها فى النقصان حتى تصل فى النهاية إلى القيمة n_p عند $(\Theta = \pi/2)$

يعنى ذلك أنه بدءا بزوايا سقوط صغيرة ، تكون الهدبة الخارجية هى التى تتذبذب فى مستوى السقوط ، ويقل الفرق بكل زوج من الهدب ينتمى لمجموعتى الهدب وله نفس رتبة التداخل ، يقل مع الزاوية Θ إلى أن يحدث تطابق عند $\Theta = E$. وبزيادة زاوية السقوط Θ عن E يبدأ الفرق فى الزيادة لكنه تكون الهدبة الداخلية هى التى تتذبذب فى مستوى السقوط .

وعلى الجانب العملى تختار عينة جيدة من مسكوفيت ميكا moscovite mica ، ويعين المستوى الذى يحتوى على المحور البصرى باستخدام ميكروسكوب مستقطبpolarising microscope ، وتفلق شريحة رقيقة من هذه الميكا وتفضض من الوجهين ، وتشكل بعد ذلك علي هيئة إسطوانة فى اتجاه تقاطع المستوى الذى يحوى المحور الضوئى للبلورة مع سطح الانفلاق لها .

ويبين الشكل رقم (٤-٨) هدب تساوى ميل المماس equal tangential inclination ، ويكون النظامان مستقطبين فى مستويين متعامدين . وقبل حدوث التطابق بين الهدب تكون الهدبة الخارجية هى التى تنتمى إلى الشعاع الذى يتذبذب فى مستوى السقوط ، فى حين أنه بعد حدوث الانطباق تنتمى الهدب الداخلية إلى مثل هذا الشعاع الذى يتذبذب فى مستوى السقوط .



شكل رقم (٨/٤) : هدب تساوى ميل المماس المتكونة عند استخدام شريحة من بللورة ثنائية

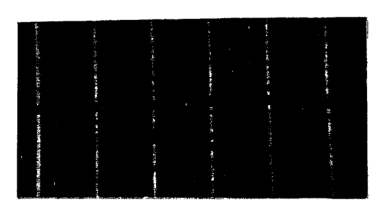
٤/٤/٣- حالة الألياف التركيبية ذات الانكسار المزدوج :

The case of synthetic fibre exhibiting birefringence :

عند غمر شعيرة من ألياف الاكريلان Acrilan fibres فى إسفين ضوئى مفضض Silvered wedge ، يحوى سائلا تم إضاءته باستخدام ضوء أحادى طول الموجة ، يسقط عموديا على مقياس التداخل الضوئى - فإنه تتكون هدب تداخل ضوئى عند النفاذ وعند الانعكاس .

ويبين الشكل رقم (٤-٩) هدب فيزو للتداخل الضوئى عند استخدام ضوء غير مستقطب وتظهر ازاحـتـان للهدبة الواحـدة ، وذلك ناتج عن الانكسار المزدوج لأليـاف الاكـريلان . Barakat and El-Hennawi, 1971-

ونذكر هنا هذا المثال فقط لتوضيح تداخل الموجات المستـقطبة ، حيث إن الفصل السادس يتناول بالتفصيل طريقة تطبيق هدب التداخل الضوئى لتعيين معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف .



شكل رقم (٩/٤) هدب التداخل المتعدد عند النفاذ عبر شعيرة من ألياف الاكريلان

٥/٤- الهولوجرافيا والتداخل الضوئى الهولوجرافى :

Holography and holographic interferometry :

١/٥/٤- الهولوجرافيا : Holography

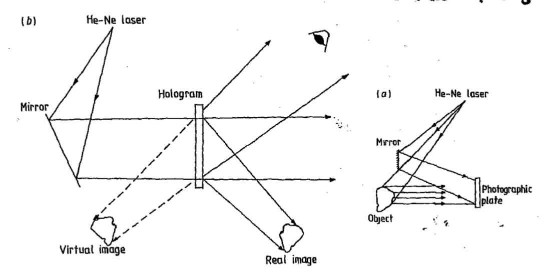
وضع « جابور Gabor » سنة ١٩٤٨ أسس الهولوجرافيا التى تسجل المعلومات الكاملة عن الموجة ، سعتها وطورها ، من المعروف أنه تسجل المعلومات عن سعة الموجة على الأفلام الحساسة كشدة ضوئية بينما تسجل معلومات طور الموجه عن طريق التراكب مع موجة مرجع مترابطة معـها . وقد تم الحصول على الهولوجرام - الصور ذات الثلاثة أبعاد أو الصور المجسمة - عمليا عام (١٩٦٢) بعد اكتشاف أشعة الليزر . والهولوجرام هو نموذج للتداخل الضوئى يتكون من التقاء موجة حاملة للمعلومات عن الجسم مع موجة مرجع . ويبين

الشكل رقم (١٠/٤) النظام البصـــــرى لتكوين الهـولوجــرام . إذ تلتقى الموجـــات ذات السـعة المركبة التى تترك الجســـم $A_0 = a_0 \exp(iQ_0)$ مع الشـعـــاع المرجـــع $A_r = a_r \exp(iQ_r)$ عند اللوح الحساس ، وتعطى المعادلة الآتية توزيع الشـدة الضوئيـة الناتجة $I(x,y)$:

$$I_{(x,y)} = \left|A_o + A_r\right|^2 = \left(A_o + A_r\right)\left(A_o^* + A_r^*\right)$$
$$= a_o^2 + a_r^2 + A_o A_r^* + A_r^* A_r$$

٢/٥/٤- التداخل الضوئى الهولوجرافى : Holographic interferometry

تنقسم تطبيقات الهولوجرافيا إلى قسمين أساسيين : أولهما يحتاج إلى تكون الصور فى ثلاثة أبعاد للرؤية بالعين ، والأخرى تستخدم فيها الهولوجرافيا كأداة للقياس .

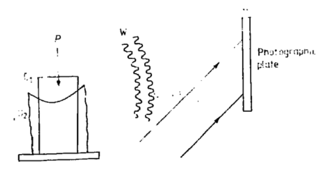


شكل رقم (١٠/٤) : رسم توضيحى لتسجيل الهولوجرام (a) وإعادة تكوين جبهة الموجة (b)

وعندما ترى العين صورة جسم فى الثلاثة أبعاد نجد الهولوجرام يسجل التفاصيل الدقيقة عن الجسم مثل الشقوق والحواف وخشونة السطوح ذات بعد حوالى ١ ميكرومتر – انظر Denisyuk 1978 .

ويعتبر التداخل الضوئى الهولوجرافى - holographic interferometry- واحد من أهم تطبيقات الهولوجرافيا التى تستخدم كأداة Ostrovsky et al. 1980, &Vest, 1979-

القياس ، ويقدم الشكل رقم (١١/٤) الفكرة العامة عن هذه الطريقة ، ويستخدم فيها نفس اللوح الحساس H لتسجيل هولوجرامين للجسم أحدهما في وضعه الأول O_1 والثاني في وضعه الأخير O_2 ، ومثال ذلك نجده في جسم تم تشويهه تحت تأثير إجهاد p .



شكل رقم (١١/٤) : يوضح تسجيل الهولوجرام بطريقة التعريض الثنائي

وفي طريقة التصوير ثنائي التعريض double-exposure technique يتكون هولوجرام الجسم قبل تشويهه ، وبعد التشويه يعرض الهولوجرام مرة أخرى للضوء الذي يصل إليه من الجسم في وضعه الجديد ، وتكون النتيجة وجود موجات متراكبة وتكون هدب تداخل ضوئي تحمل معلومات عن الازاحات التي نتجت عن تشويه الجسم . أي التغير في طول المسار الضوئي والتغير في معاملات الانكسار – مثل الذي يحدث في النفق الهوائي والعمليات المشابهة – يعطي نماذج تداخل ضوئي مماثلة . ويمكن إجراء قياس التغير في المسافات بهذه الطريقة بدقة تصل إلى $\frac{١}{١٠}$ من الميكرومتر أو أقل .

ويجد التداخل الضوئي الهولوجرافي تطبيقات في مجال الايروديناميكي aerodynamics حيث يستخدم في دراسة سريان الموائع حول الأجسام المختلفة .

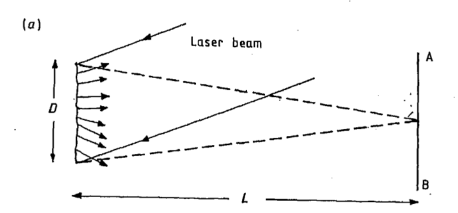
٦/٤– البقيعات الضوئية والتداخل الناتج عنها : Speckle and speckle interferometry

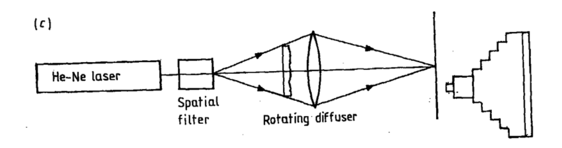
عندما يضاء سطح خشن بضوء مترابط ، فإن حزمة الأشعة المنعكسة تكون نموذجا عشوائيا random pattern من نقاط مضيئة ونقاط مظلمة تسمى بالبقيعات الضوئية (Françon, 1979) ، ويمكن تفسير هذه النماذج باستخدام مبدأ هيجنز Huygen's principle الذي ينص على أن شدة الضوء عند أي نقطة في المجال

المضاء تكون نتيجة تداخل المويجات التى تتشتت من النقط المختلفة فى المنطقة المضاءة من السطح ، ويختلف طور هذه المويجات باختلاف الارتفاعات على السطح الخشن . ويعتمد النموذج الفراغى spatial pattern ودرجة تباين البقيعة الضوئية على النظام البصرى المستخدم لرؤيتها ، ودرجة ترابط الضوء المستخدم فى الإضاءة ودرجة خشونة السطح المضاء .

ويمكن ملاحظة البقيعات الضوئية عندما ينفذ شعاع ضوئى مترابط أحادى طول الموجة خلال جسم نصف شفاف ذى سطح خشن ، ويوضح الشكل رقم (١٢/٤) نظاما بصريا مبسطا لتسجيل البقيعات الضوئية عند الانعكاس . وتوجد هذه البقيعات فى كل الفراغ أمام الجسم الخشن والحائل AB . وتعطى المعادلة الآتية متوسط القطر $<\delta>$ للبقيعة الضوئية الناتجة من سقوط حزمة من الأشعة الضوئية ذات طول موجى λ على مساحة مستديرة قطرها D :

$$< \delta > = 1.2 \, L/D$$





شكل رقم (١٢/٤) النظام البصرى المستخدم لتسجيل البقيعات الضوئية (لمزيد من التفاصيل يرجع الى المتن) .

حيث L هى المسافة بين السطح المضاء والحائل أو الفيلم الحساس .

وتعتبر العناصر المسئولة عن تشتت الضوء التى تساهم فى التداخل الضوئى المكون للبقيعات الضوئية عاملا هاما يحدد خصائص هذه البقيعات .

ولتصوير البقيعات الضوئية يضاء جسم له سطح خشن بحزمة من الأشعة الضوئية من مصدر مترابط مرتين ينتج عن ذلك نموذج للبقيعات المتكونة فى الصورة الأولى مزاحة عدة ميكرومترات قليلة عن الصورة الثابتة ، ويتوفردائما علاقة ترابط بين النموذجين . وتسمى هذه الطريقة بالتصوير ثنائى التعريض للبقيعات الضوئية ، Doube-exposure speckle photography ، وتستخدم بكثرة طرق تصوير البقيعات الضوئية والتداخل الضوئى الناتج عنها لقياس سرعات الموائع – Barker and Fourney, 1977, Iwata et al. 1978 Simpkings and Dudderer 1978, Barakat et al. 1987 .

وتستخـدم أيضـا فى قياس الإزاحات والإجهادات – Barker and Fourney, 1976 – وقد طبـق "Barakat et al" (١٩٨٦) طريقة التصوير ثنائية التعريض للبقيعات الضوئية لقياس سرعة دوران سطح خشن على هيئة قرص من زجاج مصنفر . وفى هذه الطريقة يوجه شعاع ليزر نبضى (λ = ٦٩٤٠ أنجستروم) من خلال فتحة ضيقة ثم يتم زيادة مساحة مقطع حزمة الأشعة لتضئ مساحة ذات قطر ٢٠ ملليمتر على قرص الزجاج المصنفر الذى يدور حول مركزه . وتسقط نبضتان من أشعة الليزر على لوح حساس حبيباته دقيقة ذات قوة تحليل عالية ، والزمن بين كل نبضتين متتاليتين يساوى ٨٠٠ ميكروثانية . وبعـد تظهيـر الفـيلم الحسـاس يوضع فى نظام ترشـيح وتظهـر مـجـمـوعـة من هدب يونج Young's fringes ، وتعطى المعادلة الآتية العلاقة بين المسافة S التى تفصل أى هدبتين متجاورتين والإزاحة :

$$X = D / S$$

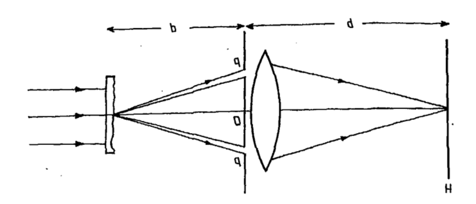
حيث D هى المسافة بين الفيلم الحساس والمستوى الذى يتم فيه الرؤية .

٤/٦/٢- تداخل البقيعات الضوئية : Speckle interferometry

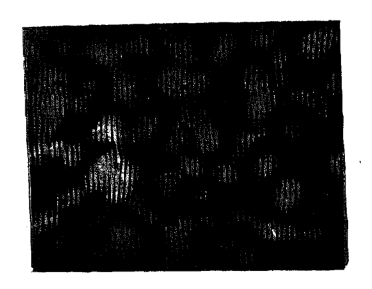
تم فى التجربة التى قام بها جونز ويكس (Jones and Wykes 1983) فى تداخل البقيعات الضوئية ، الحصول على هدب تداخل نتجت عن مجموعتان من البقيعات تربطهما

علاقة ترابط . نتج ذلك إما عن إزاحة بين المناطق المترابطة من نموذجى البقيعات أو وجود تغير فى الطور بينهما . ويبين الشكل رقم (١٢/٤/ب) النظام البصرى المستخدم فى تداخل البقيعات الضوئية ، وفيه يسمح لحزمة الأشعة المنبعثة من ليزر هيليوم – نيون بأن تسقط على سطح خشن من الزجاج المصنفر عن طريق ثقبين دائريين قطر كل منهما ٢مم تفصلهما مسافة قدرها ٢٠مم ، وتستخدم عدسة لتكوين صورة البقيعات الناتجة من الجسم ، بحيث تكون قوة التكبير مساوية للواحد الصحيح ، وينتج عن ذلك تركيب شبكى داخل البقيعات وقد وجد أن البعد بين أى هدبتين متجاورتين لهذا التركيب تساوى ٩,٥ ميكرون . يتم تسجيل صورتين للبقيعة المتكونة ومعها تركيبها الشبكى مع إزاحة الجسم إزاحة تساوى ضعف البعد بين أية هدبتين متجاورتين تدخلان فى التكوين الشبكى grid spacing أى المسافة البينية لكل هدبتين متجاورتين . أعقب ذلك تسجيل البقيعات بعد إزاحة الجسم مضاعفات للمسافة البينية للشبكة أى ٣٨ و٥٧ و٧٦ ميكرون ، وكان اتجاه الإزاحة موازيا للخط المستقيم الذى يصل بين الفتحتين ، وبعد تظهير اللوح الحساس الذى تم تعريضه مرتين يأخذ مكانه فى نظام الترشيح – كما هو موضح فى الشكل رقم (١٣/٤) ويبين الشكل رقم (١٤/٤) التركيب الشبكى الذى تم تكوينه وبهدف قياس الإزاحة ومن ثم السرعات .

من الأهمية بمكان ان نذكر المدى الذى تقع فيه الإزاحات التى يمكن قياسها بطريقة التعريض الثنائى باستخدام البقيعات الضوئية وباستخدام تداخل البقيعات الضوئية وعند استخدام الطريقة الاولى تكون أقل إزاحة مقاسة مساوية لأقل قطر δ للهدبة المتكونة من سطح خشن مستخدم كمشتت . ومن مواصفات النظام البصرى المستخدم نجد أن قيمة قطر البقيعة يساوى ١٠ ميكرون تقريبا . ولكى يمكن تسجيل مثل هذه البقيعات منفصلة عن بعضها عمليا ينبغى استخدام مستحلب له قوة تحليل عالية ، حيث يكون قطر حبيباته أقل من قطر البقيعة .



شكل رقم (١٣/٤) : النظام البصرى المستخدم فى عملية الترشيح



شكل رقم (١٤/٤) : التركيب الشبكى المتكون باستخدام طريقة تداخل البقيعات

فى حالة ماتكون إزاحة الجسم أقل من قطر البقيعة ينبغى استخدام طريقة التداخل بين البقيعات القائم على التعريض الثنائى . وفى هذه الحالة تكون أقل إزاحة مقاسة مساوية للمسافة البينية للشبكة المتكونة داخل البقيعة ، هذه المسافة تساوى λ P/D ، حيث D هي البعد بين الثقبين المتماثلين ، P بعد الجسم عن مستوى الثقبين .

References

Barakat N 1958 *J. Opt. Soc. Am.* **48** 92

Barakat N, El-Ghandoor H, Merzkirch W and Wernekink U 1988 *Exp. Fluids J.***6** 71

Barakat N and El-Hennawi H A 1971 *Textile Res. J.* **41** 391 .

Barakat N, Hamed A H and El-Ghandoor H 1987 *Optik* **76** 78

Barakat N, Merzkirch W and El-Ghandoor H 1986 *Optik* **74** 114

Barker D B and Fourney M E 1976 *Exp. Mech.* **18** 209

——— 1977 *Opt. Lett.* **1** 136

Denisyuk Yu N 1978 *Fundamentals of Holography* (Moscow: Mir) pp 116-18

Françon M 1979 *Laser Speckle and Applications in Optics* (New York : Academic)

Gabor D 1948 Nature **161** 777

Iwata K, Hakoshima T and Nagata R 1978 *Opt. Commun.* **25**

Jones R and Wykes C 1983 *Holographic and Speckle Interferometry* (Cambridge: Cambridge University Press)

Ostrovsky Yu I, Butusov M M and Ostrovskaya G V 1980 *Interferometry by Holography* (Springer Series in Optical Sciences) (Berlin : Springer) pp 73-5

Simpkins P G and Dudderer T D 1978 *J. Fluid Mech.* **89** 665

Tolansky S 1948 *Multiple-Beam Interferometry of Surfaces and Thin Films* (Oxford: Clarendon) p 126

———1955 *An Introduction to Interferometry* (London : Longmans, Green)

Tolansky S and Barakat N 1950 *Proc. Phys. Soc.* **63** 345

Vest C M 1979 *Holographic Interferometry* (New York : Wiley)

الفصـل الخامس

تطبيقات التداخل الضوئى الثنائى على الألياف

Two -beam Interferometry Applied to Fibrous Materials

٥/١- مقدمة :

وضح فى أثناء دراسة تركيب الألياف فى الفصل الثالث أن معظم الألياف الطبيعية والتركيبية لها خاصية التباين الضوئى optical anisotropy ، وأن معاملات انكسار هذه الألياف للضوء المستقطب فى اتجاه محور الشعيرة ($n^{\parallel}$) وفى الاتجاه العمودى عليه ($n^{\perp}$) والانكسار المزدوج (Δn) ، حيث $\Delta n = n^{\parallel} - n^{\perp}$ ، تمثل بارامترات تحدد الخواص الضوئية والتركيبية لهذه الألياف على المستوى الجزيئى . وتقدم هذه البارامترات معلومات مفيدة للباحثين ومنتجى ومستخدمى الألياف ، حيث تلعب دورا هاما فى معرفة طريقة تنظيم الجزيئات فى هذه الألياف . ويمكن تعيين هذه الخواص الضوئية باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى الثنائى Two-beam interference microscope ، وتقدم هذه الطريقة معلومات كمية عن الخواص الضوئية لقشرة ولب الشعيرات غير المتجانسةheterogeneous fibres ، وكذلك يقدم ميكروسكوب التداخل الضوئى الثنائى معلومات عن تغير معاملات انكسار الألياف بتغير :

أ- طول موجة الضوء المستخدم .

ب- درجة الحرارة .

جـ- قوة الشد الواقع على الشعيرة .

ويهدف هذا الفصل إلى شرح نظرية وتطبيق ميكروسكوبات التداخل الضوئى الثنائى لدراسة الألياف فى الحالات الآتية :

١- ألياف ذات مقاطع عرضية منتظمة وغير منتظمة :

أ- الألياف المتجانسة .

ب- الألياف غير المتجانسة والتى يحتوى تركيبها على قشـرة ولب جـ- الأليـاف متـعددة الطبقات multilayer fibres .

٢-الألياف البصرية بنوعيها GRIN, STEP .

وسنتناول فى الفصل السابع استخدام طرق التداخل الضوئى فى تعيين تضاريس سطح الألياف ودرجة الملاسة وعدم الانتظام فى نصف قطر الشعيرة على امتداد محورها .

وتنقسم الأجسام بالنسبة للميكروسكوب الضوئى إلى أجسام تغير من سعة الموجة amplitude objects وأجسام تغير من طور الموجة phase objects . وفى الحالة الأولى تختلف الأجسام فى درجة امتصاصها للضوء بالنسبة للوسط المحيط بها ، وبذلك توجد نسبة معينة من التباين بين الجسم والوسط المحيط به . أما الاجسام التى تغير طور موجة الضوء فلاتؤثر فى الضوء الممتص لكنها تختلف عن الوسط المحيط بها نتيجة سمكها الضوئى optical thickness (nt) حيث n معامل انكسار المادة ، t قيمة سمكها . وتقوم ميكروسكوبات التداخل الضوئى فى استخداماتها على فكرة الأجسام التى تغير طور الموجة phase objects .

وقد ابتكرت عدة ميكروسكوبات ضوئية كل منها يحتوى على مقياس تداخل ضوئى ثنائى مثل مقياس ماخ وزندر Mach - Zehnder ونومارسكى Nomarski وميكروسكوب التداخل الضوئى المستقطب لبلوتا Pluta Polarising Interference Microscope والانترفاكو Interphako وميكروسكوب بيكر Baker ودايسون Dyson وليتز Leitz وزايس - لنيك Zeiss-Linnik .

ويحتوى الفصل التاسع على شرح تفصيلى للنظام البصرى ومسار الضوء وتكون صور التداخل الضوئى الثنائى للأجسام باستخدام أنواع من هذه الميكروسكوبات . أما فى هذا الفصل فسندرس نظرية وتطبيق هذه الميكروسكوبات لتعيين خواص الألياف مع التركيز على معاملات الانكسار للألياف ذات المقاطع العرضية المنتظمة وغير المنتظمة والمتجانسة التركيب وغير المتجانسة وكذلك استنباط بروفيل معامل الانكسار للألياف البصرية بنوعيها الـSTEP والـGRIN .

٥/١/١- الدراسات السابقة لتطوير وتطبيق طريقة التداخل الضوئى الثنائى على الألياف النسيجية

Previous investigations and reviews of the literature on the development of interference microscopy and its application to textile fibre materials :

قدم « بلوتا Pluta » عام (١٩٨٢) فى كتابة باللغة البولندية عرضا عن تطوير ميكروسكوبات التداخل الضوئى ابتداء من تصميم جامن – ليبيدف Jamin-Lebedev وسمث Smith ، وبلوتا Pluta . والميكروسكوبات التى تتبع نظام « ماخ وزندر Mach-Zehender » – يرجع إلى عرض وتلخيص لهذا الكتاب باللغة الإنجليزية قدمة «سيكورسكى Sikorski » عام (١٩٨٤) – كما شمل هذا الكتاب دراسة تفصيلية عن ميكروسكوبات التداخل الضوئي الثنائى متضمنة الميكروسكوبات التى تعمل بالضوء المنعكس ، وذكر المؤلف الأسباب التى دعت إلى تصميم ميكروسكوب بلوتا – Pluta, 1971, 1972 .

وقد استخدم Faust (١٩٥٦) ميكروسكوب سميث – بيكر Smith - Baker لتعيين التغير فى معاملات الانكسار لعينات غير متجانسة ضوئيا . وتم الحصول على مجموعة هدب عيارية فى الخلفية بإدخال شريحة من الكوارتز بين الشعيرة والمحلل analyser .

وطور "Mckee and Woods" (١٩٦٧) هذه الطريقة حيث تم الاستغناء عن شريحة الكوارتز .

واستخدم "McLean" (١٩٧١) ميكروسكوب ليتز Leitz للتداخل الضوئى الثنائى لتحليل التغيرات الشاذة فى معامل الانكسار المزدوج لألياف البولى استر . وقيس معامل الانكسار المزدوج لألياف الاكريلك acrylic fibres المشدودة فى جو من البخار وذلك عند نسب سحب مختلفة باستخدام ميكروسكوب زايس Zeiss Ultraphot للتداخل الضوئى- Blakey et al., 1970 - ولميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا –Pluta, 1965, 1971, 1972 – القدرة على توفير مجال رؤيا متجانس أو هدب تداخل ضوئى مع انقسام عرضى للصورة Lateral image duplication ، وباستخدام هذا الميكروسكوب يمكن استنباط معلومات كمية عن معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لقشرة ولب شعيرات الألياف المختلفة .

واستخدم بلوتا – "Pluta" (١٩٧٢) هذا الميكروسكوب لدراسة بعض الألياف التركيبية .

كما استخدم "Hamza and Sikorski" (١٩٧٨) هذا النوع من الميكروسكوبات لتعيين

الخواص الضوئية لألياف الكفلار (PPT) ، وقاما بحساب استقطابية هذه الألياف باستخدام النموذج الجزيئى molecular model الذى قدمه "Northolt" (١٩٧٤) مع قيم استقطابية الروابط الكيميائية التى قدمها "Denbigh" (١٩٤٠) وكذلك "Bunn and Daubeny"(١٩٥٤) ، وباستخدام صيغة لورنتز – لورنز Lorentz-Lorenz حسبت قيم معاملات الانكسار الأساسية لهذه الألياف ذات الانكسار المزدوج العالى .

وعين "Simmens" (١٩٥٨) الانكسار المزدوج للأجسام غير المنتظمة المقاطع العرضية .

واستخدم "Hamza" (١٩٨٠) ميكروسكوب بلوتا لقياس معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف غير المنتظمة المقاطع العرضية .

وعين "Żurek and Zakrzewski" (١٩٨٣) معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لألياف القطن باستخدام ميكروسكوب بلوتا باتباع الطريقة التى قدمها "Hamza" (١٩٨٠) وقد أجرى هذان الباحثان هذه القياسات بوضع شعيرات القطن فى محلول له قوة تفرق عالية وتمت القياسات لطولين موجيين من الضوء ، ونتجت صورتان للشعيرة كانت إحداهما نتيجة معامل الانكسار فى اتجاه محور الشعيرة ($n^{\parallel}$) والأخرى نتيجة معامل الانكسار فى الاتجاه العمودى عليه ($n^{\perp}$) . وهذه الطريقة هى نتيجة تزاوج طريقة "Simmens" (١٩٥٨) وطريقة بلوتا "Pluta" (١٩٦٥) The dual-wavelength method .

كما عالج "Dorau and Pluta" (١٩٨١) صعوبة القياس الدقيق للمسار الضوئى فى مجال التداخل الضوئى عند قياس إزاحات الهدب ، فعند استخدام ميكروسكوب بلوتا مع مستقطبات متعامدة يمكن الاستعانة بالضوء الأبيض للتعرف على الهدبة الصفرية Zero-order fringe واستخدم Hamza and co-workers ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا لدراسة ألياف البولى استر والكفلار وسليولوز الرايون النشادرى cuprammonium وألياف المركبات المزدوجة من مادتين bicomponent ذات المقاطع العرضية المنتظمة وغير المنتظمة لتعيين معاملات انكسارها والانكسار المزدوج Hamza (1986), Hamza and Abd El-Kader (1986), Hamza and El-Farahaty (1986), Hamza and El-Dessouki (1987) and Hamza et al., (1986).

وقد لخص « حمزة Hamza » عام (١٩٨٦) الأبحاث التى استخدم فيها ميكروسكوب التداخل الضوئى الثنائى لدراسة الألياف النسجية مع توضيح للطريقة المستخدمة ونوع الألياف ونتائج هذه الأبحاث .

٥/٢- نظرية ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا Theory of the Pluta microscpe :

يمثل هذا الجهاز ميكروسكوب تداخل ضوئى يمكن بواسطته الحصول على مجال رؤيا متجانس uniform أو هدب تداخل ضوئى تعبر صورتين منفصلتين للجسم تحت الفحص .

وقد طبق "Hamza" (١٩٨٠) هذا الميكروسكوب لقياس معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف ذات المقاطع العرضية العرضية غير المنتظمة ، ويتضمن قياس معامل الانكسار المتوسط للشعيرة . وقد أجريت هذه القياسات بالاستخدام التكاملى لكل من ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا والميكروسكوب الألكترونى الماسح الذى تم بواسطته تعيين مساحة مقطع الشعيرات .

تعطى المعادلتان التاليتان فرق طول المسار الضوئي $\Delta\Gamma_{\parallel}$, $\Delta\Gamma_{\perp}$ بين العينة وسائل الغمر ، باعتبار أن معامل انكسار السائل هو n_L ، ومعاملا انكسار الشعيرة المتوسط للضوء المستقطب استوائيا فى اتجاه محور الشعيرة وفى الاتجاه العمودى عليه هما $n_a^{\parallel}$, $n_a^{\perp}$ على الترتيب :

$$\Delta\Gamma_{\parallel} = (n_a^{\parallel} - n_L)\, t \qquad (5.1)$$

$$\Delta\Gamma_{\perp} = (n_a^{\perp} - n_L)\, t \qquad (5.2)$$

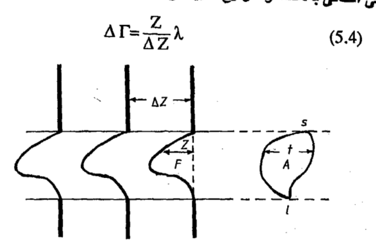
وتقاس قيم $\Delta\Gamma_{\parallel}$, $\Delta\Gamma_{\perp}$ بوحدات قياس الطول (المليمتر مثلا) ويقاس سمك الشعيرة (t) بنفس الوحدة .

وتعطى المعادلة (٥-٣) معامل الانكسار المزدوج المتوسط Δn_a :

$$\begin{aligned}\Delta n_a &= n_a^{\parallel} - n_a^{\perp} \\ &= (\Gamma_{\parallel} - \Gamma_{\perp})\,/t.\end{aligned} \qquad (5.3)$$

ويبين الشكل (٥/١) هدب التداخل الضوئى الثنائى عندما تعبر شعيرة ذات مقطع عرضى غير منتظم مساحته A - أو إحدى الصورتين الناتجتين من ميكروسكوب التداخل الضوئى الثنائى بالانكسار المزدوج - ويعطى فرق طول المسار الضوئى $\Delta\Gamma$ بالمعادلة :

$$\Delta\Gamma = \frac{Z}{\Delta Z}\lambda \qquad (5.4)$$



شكل رقم (٥/١) : هدب التداخل عبر شعيرة غير منتظمة المقطع العرضى ومساحته A .

حيث Z هى مقدار ازاحة الهدبة عندما تعبر الشعيرة فى اتجاه عمودى على محورها ، ΔZ هى المسافة بين هدبتين متتاليتين فى منطقة السائل ، λ هى طول موجة الضوء المستخدم .

وعلى ذلك يمكن كتابة المعادلات الآتية :

$$\frac{Z^{\parallel}}{\Delta Z} = (n_a^{\parallel} - n_L)\frac{t}{\lambda} \qquad (5.5)$$

$$\frac{Z^{\perp}}{\Delta Z} = (n_a^{\perp} - n_L)\frac{t}{\lambda} \qquad (5.6)$$

$$Z^{\parallel} = t\frac{\Delta Z}{\lambda}(n_a^{\parallel} - n_L) \qquad (5.7)$$

وبإجراء التكامل للمعادلة (٥-٧) فى المنطقة $l \geq d \geq s$ تنتج المساحة F المحصورة تحت إزاحة الهدبة عندما تعبر الشعيرة :

$$\int_s^l Z^{\parallel} dx = \frac{\Delta Z}{\lambda}(n_a^{\parallel} - n_L)\int_s^l t\, dx \qquad (5.8)$$

$$F^{\parallel} = \frac{\Delta Z}{\lambda}(n_a^{\parallel} - n_L) A$$

حيث A هو متوسط مساحة المقطع العرضى للشعيرة ، وتعطى المعادلات (٥-٩) ، (٥-١٠) (٥-١١) قيمة معاملات الانكسار المتوسط $n_a^{\perp}$, $n_a^{\parallel}$ والانكسار المزدوج المتوسط : Δn_a

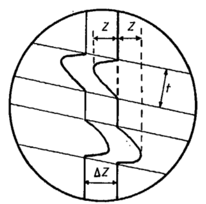
$$n_a^{\parallel} = n_L + \frac{F^{\parallel}}{\Delta Z}\frac{\lambda}{A} \qquad (5.9)$$

$$n_a^{\perp} = n_L + \frac{F^{\perp}}{\Delta Z}\frac{\lambda}{A} \qquad (5.10)$$

$$\Delta n_a = \left(\frac{F^{\parallel} - F^{\perp}}{\Delta Z}\right)\frac{\lambda}{A} \qquad (5.11)$$

ويعتمد اتجاه إزاحة الهدبة عندما تعبر الحد الفاصل بين السائل والشعيرة على قيمة معامل إنكسار الشعيرة بالنسبة لمعامل انكسار سائل الغمر المستخدم . فهدب التداخل المستقيمة فى منطقة السائل تزاح إلى أعلى أو إلى أسفل عند عبورها للشعيرة .

ويوضح الشكل رقم (٥/٢) هدب التداخل الضوئى ، وفيه تظهر صورة مزدوجة للشعيرة ظهرت فيها إزاحة الهدبة فى اتجاهين متضادين . والجدير بالذكر أنه لزيادة دقة القياس يؤخذ فى الاعتبار المسافة $2Z = (Z_1 + Z_2)$ بدلا من قياس الإزاحة Z فى احدى الصورتين فقط .



شكل رقم (٥/٢) : صورة مزدوجة لشعيرة سمكها t ، وإزاحة الهدب داخلها Z والبعد بين هدبتين متتاليتين ΔZ .

ويمكن استخدام الضوء احادى طول الموجة والضوء الأبيض مع ميكروسكوب بلوتا ، ويستخدم الأخير أساسا لتحديد موقع الهدبة الصفرية Acromatic fringe ، ويبين الشكل

رقم (٣/٥) هدب التداخل الضوئى عندما تعبر شعيرة متجانسة مغمورة فى سائل معامل انكساره n_L ، وقد ظهرت فى هذا الشكل الصورة المزدوجة للشعيرة .

Condition	Analyser		Notes
	Position of polariser		After rotation fringe deviation
$n^{\parallel} > n^{\perp} > n_L$			Not reversed
$n^{\parallel} > n_L > n^{\perp}$			Reversed
$n_L > n^{\parallel} > n^{\perp}$			Not reversed

شكل رقم (٣/٥) : اتجاه إزاحة الهدب عبر شعيرة متجانسة معاملى انكسار مادتها $n^{\parallel}, n^{\perp}$ مغمورة فى سائل معامل انكساره n_L .

وعند فحص شعيرات ذات مقطع عرضى دائرى تتكون من قشرة ولب تظهر هدب التداخل الضوئى كما فى الشكل (٤/٥) ، وفى حالة الشعيرة المتجانسة ذات المقطع العرضى الدائرى تظهر إزاحة الهدب على شكل نصف قطع ناقص لها أنصاف المحور الأساسيين (a & b) حيث :

$$a = r_f = t/2 \quad \text{and} \quad b = \delta Z \quad \text{at } x = o \qquad \text{(Barakat, 1971)}$$

والمساحة تحت إزاحة الهدبة المحصورة بين $x = -r_f$ ، $x = +r_f$ هى $F = \frac{\pi ab}{2}$.

بينما مساحة المقطع العرضى للشعيرة A يساوى $\pi t^2 / 4$ كما هو موضح بالشكل (٥/٥).

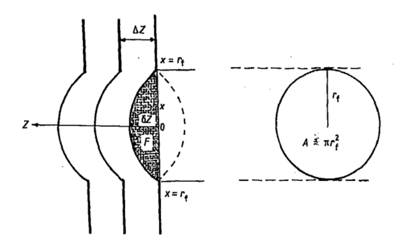
وبالتعويض فى المعادلات (٩/٥) ، (١٠/٥) ، (١١/٥) ينتج أن :

$$n_a^{\parallel} - n_L = \frac{(\delta Z^{\parallel})_{x=o}}{\Delta Z} \frac{\lambda}{t}$$

ونحصل على معادلة مشابهة فى حالة $n^{\perp}$ ، وتعطى المعادلة الآتية معامل الانكسار المزدوج :

$$\Delta n_a = \frac{(\delta Z^{\parallel} - \delta Z^{\perp})_{x=o}}{\Delta Z} \frac{\lambda}{t}$$

شكل رقم (٤/٥) : صور مزدوجة لشعيرة مغمورة فى سائل معامل انكساره n_L باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى المستقطب ويوضح شكل هدب التداخل الضوئى عبر شعيرة إسطوانية نصف قطر لبها r_c ومعامل انكسار مادته n_c ونصف قطر قشرتها r_s ومعامل انكسار مادته n_s . ويظهر فى الشكل حالتان (١) عندما تكون $n_s > n_L$ ، (٢) عندما تكون $n_s < n_L$ ويوجد فى كل حالة ثلاث احتمالات (أ) $n_c > n_s$ (ب) $n_c = n_s$ (جـ) $n_c < n_s$ (من Hamza, 1986).



شكل رقم (٥/٥) : هدب التداخل عبر شعيرة إسطوانية متجانسة .

وتستخدم هذه المعادلة في حالة مقياس التداخل الضوئي أحادي المسار .

وعند استخدام مقياس التداخل الضوئي ثنائي المسار كما في حالة غمر شعيرة متجانسة في سائل محصور بين مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر (Wedge) فتكون المعادلة كالاتي :

$$\Delta n_a = \frac{(Z^{\parallel} - Z^{\perp})\, x{=}o}{\Delta Z} \; \frac{\lambda}{2\,t}$$

وعند فحص شعيرة متجانسة ذات مقطع عرضي غير منتظم باستخدام مقياس تداخل ضوئي ثنائي المسار تستخدم المعادلة :

$$n_a - n_L = \frac{F}{\Delta Z} \frac{\lambda}{2\,MA}$$

لتعيين معامل الانكسار المتوسط للشعيرة ، حيث M هي تكبير الصورة -

Sokker & Shahin, 1985, and Wilkes, 1985.

وتصل دقة قياس فرق طول المسار الضوئي باستخدام منشور ولاستون إلى حوالي λ 0.05 حيث λ هي طول موجة الضوء المستخدم ، وعلى ذلك لايزيد الخطأ في تعيين معامل الانكسار والانكسار المزدوج على ٠,٠٠٣ - ٠,٠٠١ وفي تعيين قطر شعيرة هو حوالي ١ ميكرومتر - (Pluta) (١٩٧٢) . وتوضح صور التداخل الضوئي microinterferograms

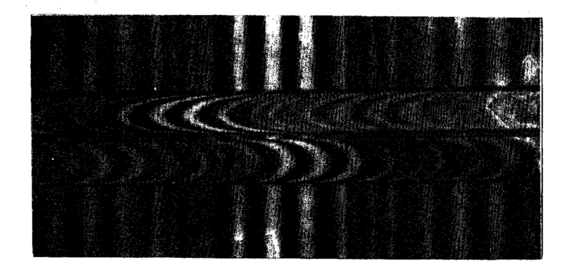
الآتية سلوك هدب التداخل الضوئى عندما تعبر الشعيرة وكيفية استخراج المعلومات من هذه الصور . وقد استخدم ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا وكذلك ميكروسكوب الانترفاكو Interphako لدراسة الألياف التركيبية . والصور الآتية هى حصيلة استخدام ميكروسكوب بلوتا فى دراسة ألياف البولى بروبيلين والكفلار والكورتل (ألياف عديد الأكريلك).

وقد استخدم ميكروسكوب الانترفاكو فى دراسة ألياف البولى إثيلين وألياف البولى استر ، ويبين الشكل (٥/٦/أ-ب) صورتين للتداخل الضوئى لألياف البولى بروبيلين - نسبة سحب ٥,٢ - باستخدام ضوء أبيض مع ميكروسكوب التداخل الضوئى لتكوين صورة مزدوجة (رقم أ) وصورة غير مزدوجة تفاضلية تعطى الانكسار المزدوج (رقم ب) .

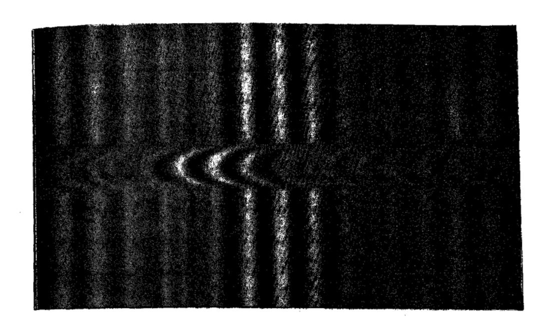
ويبين الشكل (٥/٧) صورة هدب التداخل الضوئى لنفس الشعيرة باستخدام سائل معامل انكساره يساوى ١,٤٨٠٠ عندما يستخدم ضوء طول موجته λ = ٥٤٦ نانومتر .

ويبين الشكل رقم (٥/٨/أ) صورة غير مزدوجة لألياف الكفلار ١٧ باستخدام الضوء الابيض - لاحظ أن إزاحة الهدبة داخل الشعيرة تزيد على ثمانية عشر رتبة تداخل ضوئى .

وفى الشكل رقم (٥/٨/ب) ظهرت الصورة المزدوجة للشعيرة من ألياف الكفلار باستخدام الضوء أحادى طول الموجة (λ = ٥٤٦ نانومتر) من ميكروسكوب بلوتا .



شكل ٥/٦(أ)

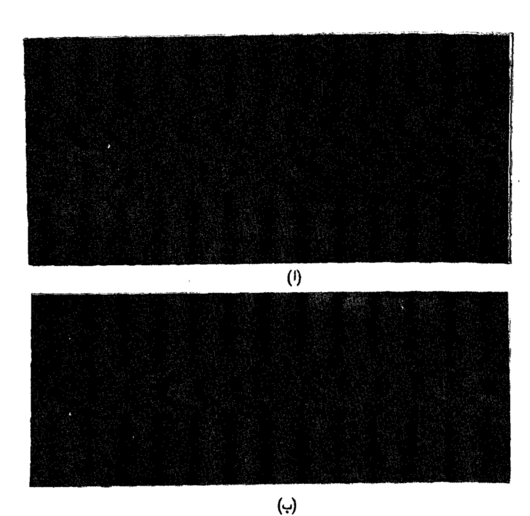


(ب)

شكل رقم (٦/٥) : صور مزدوجة (أ) وصور غير مزدوجة تفاضلية (ب) تعطى الانكسار المزدوج لشعيرة البولى بروبيلين المشدودة بنسبة سحب ٥,٢ وذلك باستخدام ميكروسكوب بلوتا مع الضوء الأبيض وسائل معامل انكساره ١,٤٨٠٠ عند ١٧°م .

ويوضح الشكل رقم (٩/٥) صورة مزدوجة لألياف النايلون ٦ – منتج مصرى – باستخدام الضوء الابيض مع ميكروسكوب بلوتا ، بينما يوضح الشكل رقم (١٠/٥) الصورة المزدوجة لألياف الكورتل باستخدام الضوء الأبيض مع ميكروسكوب بلوتا .

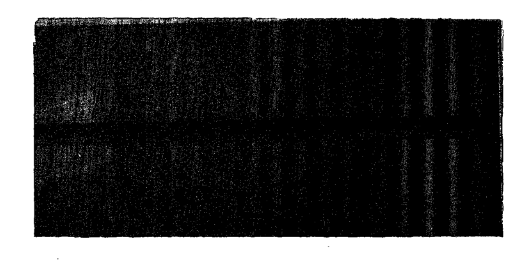
واستخدم ميكروسكوب الانترفاكو Interphako للتداخل الضوئى فى قياس معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف ، ويوضح الشكل رقم (١١/٥/أ) صورة التداخل الضوئى لشعيرة من ألياف البولى إيثيلين ، باستخدام الضوء الأبيض الذى يتذبذب فى مستوى عمودى على محور الشعيرة ، بينما يوضح الشكل (١١/٥/ب) صورة التداخل الضوئى لنفس الشعيرة عندما يستخدم ضوء أحادى طول الموجة (λ = ٥٨٩,٣ نانومتر) ، ويتذبذب فى مستوى مواز لمحور الشعيرة .



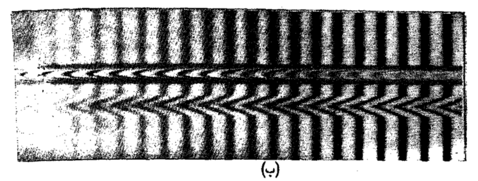
(أ)

(ب)

شكل رقم (٧/٥) : يوضح الشكل السابق عند استخدام ضوء أحادى طول الموجة عند λ = ٥٤٦ نانومتر



شكل ٨/٥ (أ)

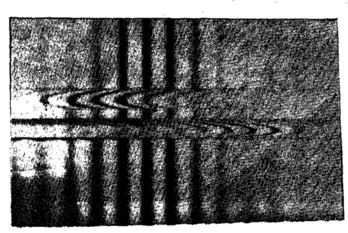


(ب)

شكل رقم (٥/٨) : (أ) صورة غير مزدوجة تفاضلية لشعيرة من ألياف الكفلار . ويلاحظ أن إزاحة الهدبة أكبر من إزاحة ١٨ رتبة (ب) صورة مزدوجة لنفس الشعيرة باستخدام ميكروسكوب بلوتا عند الطول الموجى λ = ٥٤٦ نانومتر .



شكل رقم (٥/٩) : صور مزدوجة لشعيرة نايلون ٦ باستخدام ميكروسكوب بلوتا مع الضوء الأبيض وسائل معامل انكساره ١,٥٠٨٠ عند ١٥°م .



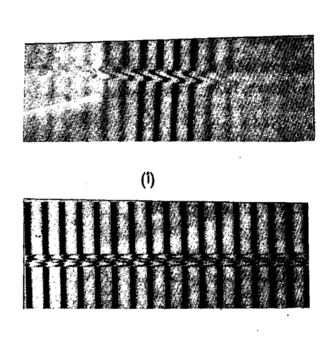
شكل رقم (٥/١٠) : صور مزدوجة لشعيرة من ألياف الكورتل باستخدام ميكروسكوب بلوتا وسائل معامل انكساره ١,٥٠٨٠ عند ١٥°م .

ويوضح الشكل رقم (١٢/٥) صورة التداخل الضوئى لشعيرة من ألياف البولى استر باستخدام الضوء أحادى طول الموجة (λ = ٥٨٩,٣ نانومتر) الذى يتذبذب فى مستوى مواز لمحور الشعيرة (أ) ، وفى الاتجاه العمودى عليه (ب) .

٥/٣- الانكسار المزدوج الجانبى للألياف : Lateral birefringence of fibres

أفاد "Morton and Hearle" (١٩٧٥) أن معاملات انكسار شعيرة للضوء قد تختلف من منطقة لأخرى عبر المقطع العرضى للشعيرة ، وتكون الألياف فى هذه الحالة متباينة الخواص الضوئية خلال هذا المقطع ، وبذلك يكون لها انكسار مزدوج جانبى Lateral birefringence .

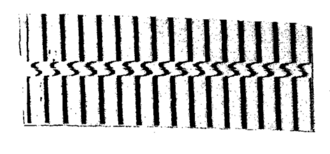
وعين "Faust" (١٩٥٦) معاملات الانكسار $n_a^{\parallel}, n_a^{\perp}$ بطريقة التداخل الضوئى لألياف رايون الفسكوز – غير المشدودة – وذلك عند نقط مختلفة على امتداد قطر الشعيرة بدءا من أحد حوافها إلى حافتها الاخرى .



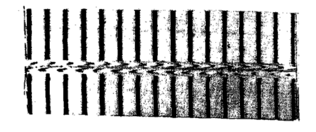
(أ)

(ب)

شكل رقم (١١/٥) : (أ) هدب التداخل الضوئى عبر شعيرة من ألياف البولى إثيلين باستخدام ميكروسكوب الانترفاكو مع الضوء الأبيض الذى يتذبذب فى مستوى عمودى على محور الشعيرة (ب) صور مزدوجة لنفس الشعيرة عند استخدام ضوء أحادى طول الموجة عند λ = ٥٨٩,٣ نانومتر ويتذبذب فى مستوى مواز لمحور الشعيرة .



(أ)



(ب)

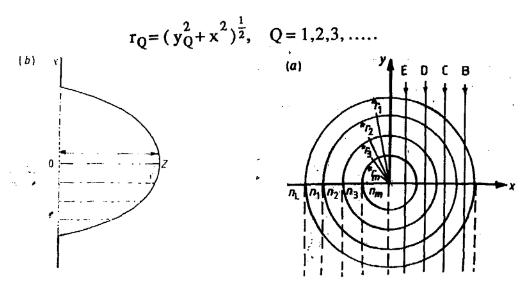
شكل رقم (١٢/٥) : هدب التداخل الضوئى عبر شعيرة من ألياف البولى استر باستخدام ميكروسكوب الانترفاكو مع ضوء أحادى طول الموجة عند λ = ٥٨٩,٣ نانومتر يتذبذب فى مستوى يوازى محور الشعيرة ، (ب) فى المستوى العمودى عليه (من Hamza, 1986)

ووجد "Faust" أن قيم $n_a^{\parallel}$ تكون ثابتة (فى حدود 0.0001 ±) بينما قيم $n_a^{\perp}$ تكون أعلى عند حواف الشعيرة عن قيمتها عند مركز الشعيرة بمقدار 0.0015 واستخدم Warner (١٩٨٣) ميكروسكوب التداخل الضوئى الثنائى ليتز Leitz لدراسة معامل الانكسار المزدوج الجانبى لألياف الكفلار .

وقام "Hamza et al" (١٩٨٩) بدراسة تحليلية لهدب التداخل الضوئى الثنائى عندما تعبر شعيرة إسطوانية متعددة الطبقات ، وفيما يلى شرح لهذه الطريقة :

يوضح الشكل (١٣/٥/أ) المقطع العرضى لشعيرة إسطوانية متعددة الطبقات (عدد طبقاتها m) ومنتظمة الشكل ومغمورة فى سائل معامل انكساره n_L ، وكان المقطع العرضى للشعيرة فى المستوى (x, y) ومعامل انكسار الطبقة رقم m هو n_m ، حيث n_1 هو معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة ، $n_m = n_{core}$ هو معامل انكسار الطبقة الداخلية . ويعطى نصف قطر كل طبقة من طبقات الشعيرة بالمعادلة :

$$r_Q = (y_Q^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}, \quad Q = 1,2,3, \ldots..$$



شكل رقم (١٢/٥) : (أ) مقطع فى شعيرة إسطوانية متعددة الطبقات (ب) إزاحة الهدب فى الشعيرة الإسطوانية

ويوضح الشكل (١٢/٥/أ) مسار حزمة متوازية من الضوء أحادى طول الموجة ذات الطول الموجى λ سقطت موازية للمحور y. وتعطى المعادلة (٥-١٢) الفرق فى طول المسار الضوئى (OPLD) optical path length difference $\Delta\Gamma$ خلال الشعيرة وسائل الغمر :

$$\Delta\Gamma = \text{OPLD} = 2 \sum_{Q=1}^{m} (n_Q - n_{Q-1}) y_Q$$

$$= 2 \sum_{Q=1}^{m} (n_Q - n_{Q-1}) (r_Q^2 - x^2)^{1/2} \qquad (5.12)$$

ومن المعادلة (٥-٤) :

$$\frac{\lambda}{2\,\Delta Z} Z = \sum_{Q=1}^{Q=m} (n_Q - n_{Q-1}) (r_Q^2 - x^2)^{1/2} \qquad (5.13)$$

حيث ΔZ هى المسافة بين كل هدبتين فى منطقة السائل ، Z هى قيمة إزاحة الهدبة المناظرة للقيمة x الواقعة على نصف قطر الشعيرة فى المستوى x,z كما هو موضح بالشكل (١٢/٥/ب).

وتعطى المعادلة رقم (٥-١٤) معامل الانكسار المزدوج فى اتجاه نصف القطر radial birefringence لشعيرة متعددة الطبقات ذات مقطع عرضى منتظم :

$$Z^{\parallel} - Z^{\perp} = \frac{2\,\Delta Z}{\lambda} \sum_{Q=1}^{m} (\Delta n_Q - \Delta n_{Q-1})\,(r_Q^2 - x^2)^{1/2} \qquad (5.14)$$

حيث Δn_Q تمثل قيمة معامل الانكسار المزدوج للطبقة رقم Q .

وقيمة إزاحة الهدبة $(Z^{\parallel} - Z^{\perp})$ هى قيمة إزاحة الهدبة فى حالة صورة التداخل الضوئى غير المزدوجة non-duplicated باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى – ميكروسكوب بلوتا مثلا .

ونحصل على الانكسار المزدوج فى اتجاه نصف القطر radial birefringence لشعيرة مكونة من طبقتين (قشرة ولب) بالتعويض فى المعادلة (٥-١٤) بالقيمة $Q = 2$.

وفى حالة الشعيرة متعددة الطبقات وذات مقطع عرضى غير منتظم تأخذ المعادلة رقم (٥-٨) الصيغة رقم (٥-١٥) :

$$F = \frac{\Delta Z}{\lambda} \sum_{Q=1}^{m} A_Q (n_Q - n_{Q-1}) \qquad (5.15)$$

حيث :

$$F = \int_{\alpha}^{\beta} Z\,dx \quad \text{and} \quad A = \int_{\alpha}^{\beta} t_Q\,dx.$$

ويمكن التوصل إلى هذه النتيجة بتكامل معادلة الشعيرة متعددة الطبقات ذات المقطع العرضى المنتظم للمنطقة $\alpha \leq x \leq \beta$ اذ ان $t_Q = y_Q$ ، وهي تعطى المساحة المحصورة تحت إزاحة الهدبة .

وفى عام (١٩٨٧) نشر " بلوتا Pluta " طريقة جديدة لتعيين معامل الانكسار المزدوج للألياف الإسطوانية بوضع الشعيرة فى اتجاه قطرى diagonally بين مستقطبين متعامدين two crossed polarisers ومغمورة فى سائل . وعند إضاءة هذه الشعيرة بضوء أحادى طول الموجة مع ملاحظتها بميكروسكوب استخدم ضوء مستقطب إضاء فتحة مستطيلة نحصل على نموذج للتداخل الضوئى من خلال شيئية الميكروسكوب . وهذا

النموذج هو فى الواقع تعبير عن تطبيق تحولات فوريير فى البصرياتoptical Fourier transform وهو يقدم طريقة جديدة لتعيين الانكسار المزدوج للألياف الإسطوانية . وذلك بالإضافة إلى إمكانية تعيين تفرق الضوء بواسطة الألياف وتغيره مع نصف قطر الشعيرة .

٤/٥- تطبيقات طرق التداخل الضوئى الثنائى على الألياف البصرية :

Applications of two-beam interferometric methods to optical fibres

يلخص الجدول رقم (١/٥) أسماء الباحثين الذين طبقوا طريقة التداخل الضوئى الثنائى لدراسة خواص الألياف البصرية ، وعلى وجه الخصوص بروفيل الألياف البصرية ذات لب معامل انكساره ثابت القيمة (STEP) ، وبروفيل الألياف البصرية ذات لب معامل انكساره يقل مع البعد عن مركز الشعيرة (GRIN) ، ويتضمن هذا الجدول الطرق التى اتبعها هؤلاء الباحثون ، وتم تجميع هذا الجدول من أعمال ,Ghatak and Thyagarajan (1980) Okoshi (1982), Marcuse and Presby (1980).

١/٤/٥- طريقة التداخل الضوئى باستخدام شريحة على شكل قرص اقتطع من الشعيرة : Interferometric slab method

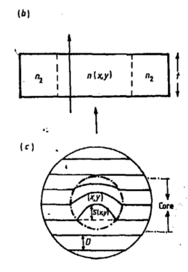
تحضر عينة القياس فى هذه الطريقة بقطع قرص slab رقيق ذى سمك يتراوح بين ١ ,٠ ، ٥ ,٠ ملليمتر) من الشعيرة . ويتم صقل وجهى الشريحة ، حيث إن سمكها لابد أن يكون ثابتا على امتداد مساحتها ويتغير لايزيد عن جزء من طول موجة الضوء المستخدم . ولقياس بروفيل معامل انكسار الشعيرة يتم إدخال قرص الشعيرة فى المسار الضوئى لأحد أذرع ميكروسكوب تداخل ضوئى ، كما هو موضح فى الشكل (١٤/٥/أ) ، وتوضع شريحة عيارية متجانسة معامل انكسار مادتها n_2 فى مسار الضوء فى الذراع الآخر لميكروسكوب التداخل الضوئى شكل رقم (١٤/٥/ب) . فإذا فرضنا أن قرص الشعيرة المراد إجراء القياسات عليه وقرص الشعيرة العيارية كانا متماثلين وكانت المرآتان تميلان على بعضهما قليلا ، فإنه فى هذه الحالة تظهر هدب التداخل الضوئى على هيئة خطوط مستقيمة متوازية وثابتة البعد بين كل هدبتين متتاليتين ، وتتبع هذه الهدب قانون توزيع الشدة الضوئية للتداخل الثنائى .

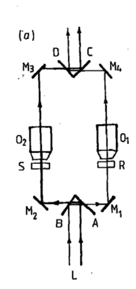
وبوضع قرص الشعيرة المطلوب دراسته فى أحد أذرع مقياس التداخل الضوئى تظهر مجموعة هدب كما هوموضح بالشكل (٥/١٤/جـ) ، وتعتمد إزاحة الهدبة $S_{(x,y)}$ على موقعها فى لب الشعيرة ، ويعتمد فرق الطور النسبى relative phase difference على التخلف فى الطور phase retardation بين قرص الشعيرة تحت الفحص وقرص الشعيرة العيارى طبقا للمعادلة رقم (٥-١٦) .

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} (n (x,y) - n_2) t \qquad (5.16)$$

$$\frac{2\pi}{D} = \frac{\psi}{S (x,y)} \qquad (5.17)$$

حيث D تمثل المسافة بين كل هدبتين متوازيتين متتاليتين :





شكل (رقم ٥/١٤) : (أ) ميكروسكوب التداخل الضوئى ثنائى الأشعة ، أحادى المسار تمثل L حزمة الأشعة الساقطة M_1, M_2, M_3, M_4 مـــرايا ، S القرص ، R القرص العيارى ، O_1, O_2 شيئيتا الميكروسكوب ، D, C, B, A . مرايا نصف عاكسة . (ب) قرص سمكه t لشعيرة متدرجة معامل إنكسار لبها ومعامل انكسار قشرتها n_2

(جـ) هدب التداخل حيث إزاحة الهدبة s (x,y) فى اللب يعتمد على موقع القياس واحداثياته x,y كما هو موضح

Table 5.1 Interferometric determination of the optical properties of optical fibres.

Authors	Methods	Results
Rawson and Murray (1973)	Interference between light reflected at both ends of the fibre	Determination of graded-index fibre parameters, C_4 and C_6, in $n^2(r) = n_0^2(1 - \delta^2 r^2 + C_4 \delta^4 r^4 + C_6 \delta^6 r^6 + ...)$
Martin (1974)	Interferometric slab method using a Michelson-type interference microscope	Index profile
Presby and Brown (1974)	Interferometric slab method	Graded-index profile, accuracy in index data to a few parts in 10^4 and a spatial resolution of 2 μm
Cherin *et al* (1974)	Interferometric slab method using a Mach-Zehnder system (Leitz interference microscope)	Refractive index measurement of three Corning multimode optical fibres
Burrus and Standley (1974)	Interferometric slab method	Viewing refractive index profiles and small-scale inhomogeneities in glass optical fibres
Burrus *et al* (1973)	Interferometric slab method	Refractive index profiles of some low-loss multimode optical fibres
Stone and Burrus (1975)	Interferometric slab method	Focusing effects in interferometric analysis of graded-index optical fibres
Presby and Kaminow (1976)	Interferometric slab method	Measured $dn/d\lambda$ for $0.5 < \lambda < 1.9$ μm with accuracy of 1 part in 10^5
Wonsiewicz *et al* (1976)	Interferometric slab method	Quick determination of index profiles by machine aided method for the interpretation of interferograms
Presby *et al* (1978)	Interferometric slab method using a two-beam single-pass interference microscope	Automatic index profiling
Shiraishi *et al* (1975)	Mach-Zehnder with light passing perpendicular to fibre axis	Index profile of graded-index fibres
Marhic *et al* (1975)	Two-beam transverse interference microscopy	Analytical expressions for OPLD for graded-index fibres with quadric index profile
Saunders and Gardner (1977)	Two-beam transverse interference microscopy	Index profile of graded-index. Determination of Δ and α of a fibre having a power law profile
Iga and Kokubun (1977, 1978)	Two-beam interference with light incident perpendicular to fibre axis	Graded-index profile, considering effect or refraction of the ray as it passes through the fibre
Kokubun and Iga (1977, 1978)	Two-Beam interference with light incident perpendicular to fibre axis	They derived successive approximation formulae for calculating index profile
Iga *et al* (1976)	Differential interferometry (shearing). One beam is laterally shifted by a shearing device in a Mach-Zehnder interferometer	Measurement of index distribution of focusing fibres
Boggs *et al* (1979)	Transverse profile automated with computer controlled video analysis	Index profile of graded-index
Presby *et al* (1979)	Rapid automatic index profiling of whole fibre samples	Index profile of graded-index

$$(n (x,y) - n_2) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\psi}{t} \qquad (5.18)$$

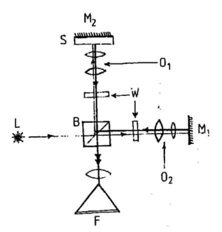
$$n (x,y) = n_2 + \frac{\lambda}{2\pi} \frac{2\pi S (x,y)}{D t} = n_2 + \frac{\lambda S (x,y)}{D t} \qquad (5.19)$$

وتقاس قيمة ازاحة الهدبة بتسجيل صورة التداخل الضوئى على لوح فوتوغرافى ، ثم يستخدم ميكروسكوب يمكن تحريكه لقياس الأبعاد الدقيقة travelling microscope للقياس .

وبتطبيق المعادلة (٥-١٩) عند استخدام ميكروسكوب تداخل ضوئى عند النفاذ transmission-type تعبر الأشعة العينة مرة واحدة . أما فى حالة ميكروسكوب التداخل الضوئى الذى يتبع نظام ميكلسون Michelson type والموضح فى الشكل (١٥/٥) - Cherin, 1983 - حيث تمر الأشعة خلال العينة مرتين فيلزم تطبيق المعادلة الآتية :

$$\Delta n (x,y) = \frac{S (x,y)}{D} \frac{\lambda}{2t} \qquad (5.20)$$

وتكون أقل قيمة لمقدار S (x,y) يمكن فصلها فراغيا spatial resolution بهذه الطريقة هى 0.7 μm ودرجة الدقة فى تعيين Δn تساوى $\pm 5x\ 10^{-4}$ (Martin, 1974) .



شكل (رقم ١٥/٥) : النظام البصرى لقياس بروفيل معامل انكسار الألياف باستخدام مقياس التداخل الضوئى القائم على نظام ميكلسون . حيث L المصدر الضوئى ، B مجزئ الحزمة الضوئية ، O_2, O_1 شيئيتا الميكروسكوب ، M_2, M_1 مرآتان ، S قرص الشعيرة ، W جهاز لإمالة جبهة الموجة Wavefront tilting .

وتكون دقة القياس فى طريقة التداخل الضوئى باستخدام قرص من الشعيرة عمليا محدودة ومرتبطة بدقة الطريقة التى تستخدم لقياس سمك القرص ودرجة صقل وتوازى وجهى هذا القرص . كما أن هذه الطريقة إتلافيه destructive للألياف ، وتحتاج إلى وقت طويل لتحضير العينات . ومصدر الخطأ الأساسى فى هذه الطريقة هو تأثير انحناء الأشعة أثناء مرورها بالقرص ، خاصة عندما يكون سمك القرص كبيرا وغير مصقول جيدا .

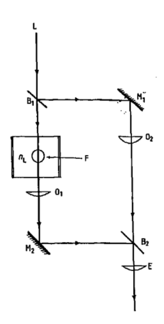
٥/٤/٢- تعيين بروفيل معامل الانكسار للألياف البصرية باستخدام هدب التداخل الناتجة من سقوط الضوء مستعرضا على الشعيرة :

Index profile of optical fibres from their interference patterns

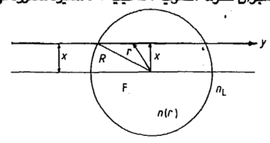
تم تطبيق طريقة التداخل الضوئى الثنائى على الألياف بسقوط الضوء مستعرضا أى عموديا على محور الشعيرة . وفى هذه الطريقة توضع العينة فى أحد مسارى الضوء لمقياس التداخل الضوئى لماخ وزندر Mach-Zahnder ، ويوضح الشكل (٥/١٦) النظام البصرى المستخدم .

وتعبر الأشعة الشعيرة عمودية على محورها . وتغمس الشعيرة فى محلول matching liquid معامل انكساره n_L يساوى معامل انكسار قشرة الشعيرة n_{clad} تقريبا . وفى هذه الحالة تمر الأشعة دون انكسار خلال قشرتها ، وبذلك يمكن تعيين الإزاحة فى طور الأشعة phase shift فى لب الشعيرة ، ويبين الشكل (٥/١٧) شعيرة مغمورة فى سائل مضاهاة - Shiraishi et al., 1975 .

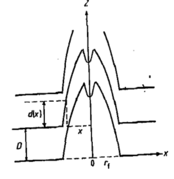
والشكل رقم (٥/١٨) لشعيرة منتظمة حول محورها ، حيث تمر الأشعة مستقيمة خلال هذه الشعيرة وتكون إزاحة الهدبة كما هو موضح بهذا الشكل .



شكل (رقم ١٦/٥) : مقياس التداخل لماخ وزندر باستخدام حزمة من الأشعة الضوئية ساقطة عمودية على محور الشعيرة ، يمثل L المصدر الضوئى ، M_2, M_1 مرآتان ، O_2, O_1 شيئيتان للميكروسكوب ، B_2, B_1 مجزآن للحزمة الضوئية ، E عينية ، F شعيرة مغمورة فى سائل مضاهاة .



شكل (رقم ١٧/٥) : شعيرة مغمورة فى سائل مضاهاة حيث F تمثل الشعيرة n (r) معامل انكسارها ، n_L معامل انكسار سائل المضاهاة .



شكل (رقم ١٨/٥) : هدب التداخل الضوئى عبر شعيرة نصف قطرها r_f ، ويمثل محورها بالاتجاه Z .

وتعطى المعادلة رقم (٥-٢١) الزيادة فى إزاحة طور الأشعة excess phase shift :

$$Q(x)\,2K\int_{x}^{R}\frac{\Delta n(r)\,r\,dr}{(r^{2}-x^{2})^{\frac{1}{2}}} \qquad (5.21)$$

حيث

$$\Delta n(r) = n(r) - n_{L}$$

و R هو نصف قطر قشرة الشعيرة :

$$Q(x) = 2\pi\frac{d(x)}{D}$$

حيث D هى المسافة بين هدبتين متوازيتين متتاليتين ، d هى المسافة التى اختيرت ليتم عندها القياس ، وبذلك يكون :

$$d(x) = \frac{2D}{\lambda}\int_{x}^{R}\frac{\Delta n(r)\,r\,dr}{(r^{2}-x^{2})^{\frac{1}{2}}} \qquad (5.22)$$

وهى صيغة تكامل آبل Abel's integral ، ويمكن أن تحل بسهولة بتعاكس آبلAbel's inversion كما سيأتى ذلك في الفصل الحادى عشر .

٥/٤/٣- طريقة التداخل الضوئى التفاضلى : Differential interferometry

طور إيجا ومجموعته "Iga et al" عام (١٩٧٨) مقياس التداخل الضوئى لماخ وزندر بإضافة جهاز قص shearing device يبنى داخل ميكروسكوب التداخل الضوئى ، ويوضح الشكل (٥/١٩) مسار الضوء فى مقياس التداخل الضوئى ، ويمكن ملاحظة نموذج التداخل الضوئى الناتج من شعاعين مر كلاهما بالشعيرة ، ويزاح أحد الشعاعين جانبا لمسافة صغيرة s ، ومايظهر كإزاحة للهدبة هو الفرق فى الطور بين الشعاعين اللذين يمران خلال الشعيرة عند x+s, x ، كما هو موضح بالشكل (٥/٢٠) .

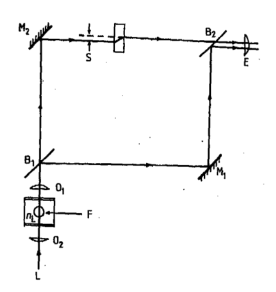
$$Q_{s} = Q(x+s) - Q(x)$$

وعندما تكون قيمة s صغيرة :

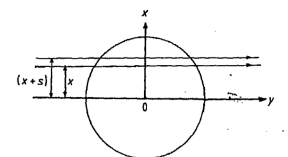
$$Q_{s} = \lim_{s\to 0}\frac{Q(x+s) - Q(x)}{s}\,s = \frac{d(Q(x))}{dx}\,s. \qquad (5.23)$$

نحصل على الإزاحة ds (x) من المعادلة :

$$d_s(x) = \frac{D}{2\pi}\frac{d(Q(x))}{dx}s. \qquad (5.24)$$



شكل (رقم ١٩/٥) : مقياس التداخل لماخ وزندر القاص المستخدم فى التداخل الضوئى التفاضلى (مكوناته كما فى الشكل (١٦/٥) ويمثل S جهاز القص shearing .



شكل (رقم ٢٠/٥) : إسهام شعاعين فى تكوين هدب التداخل التفاضلى الناتج من القص .

وبمقارنة المعادلة الأخيرة بمعادلة إزاحة الطور الإضافية فى قرص عازل dielectric ذى سمك d حيث :

$$Q = 2\pi\, d/D$$

نجد أن :

$$d_s(x) = \frac{d\,(d\,(x))}{dx}\,s.$$

ونحصل على توزيع معامل الانكسار n (r) باستخدام المعادلة (٥-٢٥) ، وفى هذه الحالة تكون طريقة التداخل الضوئى التفاضلى differential (shearing) هى طريقة مباشرة إذا ماقورنت بالمعادلة (٥-٢٢) .

$$\Delta n\,(r) = -\frac{\lambda}{\pi Ds}\int_{r}^{R} d_s\,(x)\,\frac{dx}{(x^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}} \qquad (5.25)$$

References

Barakat N 1971 *Textile Res. J.* **41** 167

Blakey P R, Montgomery D E and Sumner H M 1970 *J. Textile Inst.* **61** 234

Boggs L, Presby H M and Marcuse D 1979 *Bell Syst. Tech. J.* **58** 867

Bunn C W and Daubeny P 1954 *Trans. Faraday Soc.* **50** 1173

Burrus C A, Chinnock E L, Gloge D, Holden W S, Li T, Standley R D and Keck D B 1973 *Proc. IEEE* **61** 1498

Burrus C A and Standley R D 1974 *Appl. Opt.* **13** 2365

Cherin A H 1983 *An Introduction to Optical Fibres* (New York: McGraw-Hill)

Cherin A H, Cohen L Q, Holden W S, Burrus C A and Kaiser P 1974 *Appl. Opt.* **13** 2359.

Denbigh K G 1940 *Trans. Faraday Soc.* **36** 936

Dorau K and Pluta M 1981a *Przeglad Wtókienniczy* **35** 70

——— 1981 b *Przeglad Wtókienniczy* **35** 128

Faust R C 1956 *Q.J. Microsc. Sci* **97** 569

Ghatak A and Thyagarajan 1980 *Progress in Optics* vol XVIII ed. E Wolf (Amsterdam : North-Holland) pp 100-9.

Hamza A A 1980 *Textile Res. J.* **50** 731

——— 1986 *J. Microsc.* **142** 35

Hamza A A and Abd El-Kader H I 1986 *Phys. Ed.* **21** 244

Hamza A A and El-Dessouki T 1987 *Textile Res. J.* **57** 508

Hamza A A and El-Farahaty K A 1986 *Textile Res. J.* **56** 580

Hamza A A, Fouda I M and El-Farahaty K A 1986 *Int. J. Polym.* Mater. **11** 169

Hamza A A, Kabeel M A and Shahin M M 1990 *Textile Res. J.* **60** 157
Hamza A A and Sikorski J 1978 *J. Microsc.* **113** 15
Iga K and Kokubum Y 1977 *Tech. Digest Int. Conf., IOOC Tokyo* p 403
—— 1978 *Appl. Opt.* **17** 1972
Iga K, Kokubun Y and Yamamoto N 1976 *Record of Natl. Symp. Light Radio Waves, IECE Japan* paper S3-1
—— 1978 *Papers of Technical Group IECE Japan* no OQE 76-80
Kokubun Y and Iga K 1977 *Trans. IEEC Japan* **E60** 702
—— 1978 *Trans. IECE Japan* **E61** 184
McKee A and Woods H J 1967 *J .R. Microsc. Soc.* **87** 185
McLean J H 1971 *Textile Res. J.* **41** 90
Marcuse D and Presby H 1980 *Proc. IEEE* **68** 6
Marhic M E, Ho P S and Epstein M 1975 *Appl. Phys. Lett.* **26** 574
Martin W E 1974 *Appl. Opt.* **13** 2112
Morton W E and Hearle J W S 1975 *Physical Properties of Textile Fibres* (London: The Textile Institute) pp 573-8
Northolt M G 1974 *Europ. Polym. J.* **10** 799
Okoshi T 1982 *Optical Fibres* (London: Academic)
Pluta M 1965 *Przeglad Wtókienniczy* **19** 261
—— 1971 *Opt. Acta* **18** 661
—— 1972 *J. Microsc.* **96** 309
—— 1982 *Mikroskopia Optyczna* (Warszawa: Panstwowe Wydawnictwo Naukowe) (in Polish)
Pluta M 1987 *J. Mod. Opt.* **34** 1451
Presby H M and Brown W L 1974 *Appl. Phys. Lett.* **24** 511
Presby H M and Kaminow I P 1976 *Rev. Sci. Instrum.* **47** 348
Presby H M, Marcuse D and Astle H 1978 *Appl. Opt.* **14** 2209
Presby H M, Marcuse D, Boggs L and Astle H 1979 *Bell Syst. Tech. J.* **58** 883
Rawson E G and Murray R G 1973 *IEEE J. Quantum Electron. QE-***9** 1114
Saunders MJ and Gardner W B 1977 *Appl. Opt.* **16** 2369
Shiraishi S, Tanaka G, Suzuki S and Kurosaki S 1975 *Record of Natl. Cnov., IECE Japan* **4** 239, paper 891
Sikorski J 1984 *Proc. R. Microsc. Soc.* **19** 28 (Book review)

Simmens S C 1958 *Nature* **181** 1260
Sokkar T Z N and Shahin M M 1985 *Texile Res. J.* **55** 139
Stone J and Burrus C A 1975 *Appl. Opt.* **14** 151
Warner S B 1983 *Macromolecules* **16** 1546
Wilkes J M 1985 *Textile Res. J.* **55** 712
Wonsiewicz B C, French W G, Lazay P D and Simpson J R 1976 *Appl. Opt.* **15** 1048
Źurek W and Zakrzewski S 1983 *J. Appl. Polym. Sci.* **28** 1277

الفصـــل السـادس

تطبيق طرق التداخل الضوئى المتعدد على الأألياف

Multiple-Beam Interferometry Applied to Fibrous Materials

٦/١- تكوين هدب التداخل الضوئى المتعدد وتطبيقاتها على الأألياف :

Formation and application of multiple-beam interference fringes to fibres

طور « تولانسكى » سنة (١٩٤٤) طرق التداخل الضوئى المتعدد ، ونذكر فيما يلى طرق التداخل المستخدمة لدراسة الأألياف :

١- طريقة فيزو للتداخل الضوئى عند النفاذ .

٢- طريقة فيزو للتداخل الضوئى عند الانعكاس .

٣- هدب التداخل الضوئى المتعدد متساوى الرتبة اللونية عند النفاذ وعند الانعكاس .

ومن المفيد عند دراسة التداخل الضوئى المتعدد عند النفاذ وعند الانعكاس لفيزو أن نشرح هدب التداخل الضوئى المتعدد المتكونة عن طريق مسطحين ضوئيين مفضضين متوازيين تماما ، أى حالة مقياس التداخل لفابرى وبيرو وذلك لوجود تشابه كبير بين خواص النظامين . ويعتبر مقياس التداخل الضوئى لفابرى وبيرو فى الحالتين ١ ، ٢ حالة مثالية لطريقة فيزو للتداخل الضوئى ، وتوجد عدة تطبيقات لطرق التداخل الضوئى المتعدد عند النفاذ وعند الانعكاس .

٦/١/١- نظام هدب التداخل الضوئى المتعدد المتكونة باستخدام مسطحين مفضضين متوازيين يحصران بينهما وسطا رقيقا منتظم السمك :

The case of multiple-beam interference fringe systems formed by a plane parallel silvered thin film of constant thickness :

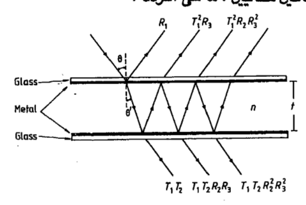
يبين الشكل رقم (١/٦) حزمة متوازية من ضوء أحادي طول الموجة سقطت على مسطحين ضوئيين متوازيين سطحاهما الداخليان مفضضان ، وكان الشعاع الضوئى الساقط يميل بزاوية مقدارها θ على العمودى على السطح العلوى .

وتعطى المعادلة رقم (٦-١) محصلة الأشعة النافذة والتى نتجت بالانعكاس المتعدد من شريحة سمكها ثابت ومقداره t ومعامل انكسار مادتها n ومغطاة بطبقة معدنية عاكسة :

$$R_T = T_1 T_2 \exp[\, i(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2)] + T_1 T_2 R_2 R_3 \exp\{\, i[(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2) + \Delta]\}$$
$$+ T_1 T_2 R_2^2 R_3^2 \exp\{\, i[(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2) + 2\Delta]\} + \ldots \quad (6.1)$$

وتعرف الخواص الطورية phase properties لطبقة الغطاء المعدنية كالآتى :

β_1 التغير فى طور الأشعة عند الانعكاس زجاج / سطح الغطاء المعدنى للشريحة العليا المواجهة للضوء الساقط ، β_3, β_2 هما التغير فى الطور عند الانعكاس وسط / سطح الطبقة المعدنية ، أى عند الحد الفاصل بين الوسط والغطاء المعدنى وذلك للشريحتين العليا والسفلى على الترتيب ، γ_2, γ_1 هما التغير فى الطور عند النفاذ من الشريحتين العليا والسفلى على الترتيب ، R_2^2 , R_1^2 هما شدة الضوء المنعكس عند السطح الفاصل زجاج / سطح معدنى ووسط / سطح معدنى على الترتيب ، R_3^2 هى شدة الضوء المنعكسة على السطح الفاصل وسط / سطح معدنى للشريحة السفلى ، T_1^2 , T_2^2 هما شدتا الضوء النافذة خلال الطبقة المعدنية للشريحتين العليا والسفلى على الترتيب Δ ، هى فرق الطور الثابت بين كل شعاعين متتاليين ، ω هى التردد .



شكل رقم (١/٦) : مسار الأشعة المكونة لهدب التداخل الضوئى المتعدد فى شريحة رقيقة سمكها ثابت عند النفاذ وعند الانعكاس

وينتج من المعادلة رقم (٦-١) أن :

$$R_T = T_1 T_2 \left(\frac{1}{1 - R_2 R_3 \exp(i\Delta)} \right) \exp[i(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2)] \qquad (6.2)$$

$$R_T = T_1 T_2 \left(\frac{1 - R_2 R_3 \exp(-i\Delta)}{[1 - R_2 R_3 \exp(i\Delta)][1 - R_2 R_3 \exp(-i\Delta)]} \right) x$$
$$\exp[i(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2)]$$

$$= T_1 T_2 \left(\frac{1 - R_2 R_3 \cos\Delta + iR_2 R_3 \sin\Delta}{1 + R_2^2 R_3^2 - R_2 R_3 \exp(-i\Delta) - R_2 R_3 \exp(i\Delta)} \right) x$$
$$\exp[i(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2)]$$

$$R_T = T_1 T_2 \left(\frac{1 - R_2 R_3 \cos\Delta + iR_2 R_3 \sin\Delta}{1 + R_2^2 R_3^2 - R_2 R_3 [\exp(i\Delta) + \exp(-i\Delta)]} \right) x$$
$$\exp[i(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2)]$$

$$= T_1 T_2 \left(\frac{1 - R_2 R_3 \cos\Delta + iR_2 R_3 \sin\Delta}{1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2} \right) \exp[i(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2)]$$

$$R_T = A_T \exp[i(\omega t + \gamma_1 + \gamma_2 + \Delta_T)] \qquad (6.3)$$

حيث A_T هى سعة المحصلة ، Δ_T هى فرق طورها بالنسبة للشعاع الأول النافذ

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda}(2nt\cos\theta) + \beta_3 + \beta_2$$
$$= \delta + \beta_3 + \beta_2$$

وتعطى المعادلة الآتية شدة الضوء I_T :

$$I_T = A_T^2$$

$$= T_1^2 T_2^2 \left(\frac{(1 - R_2 R_3 \cos\Delta + iR_2 R_3 \sin\Delta)(1 - R_2 R_3 \cos\Delta - iR_2 R_3 \sin\Delta)}{(1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2)^2} \right)$$

$$= T_1^2 T_2^2 \left(\frac{1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2}{(1 - 2 R_2 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2)^2} \right) = \frac{T_1^2 T_2^2}{1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2} \qquad (6.4)$$

$$\tan \Delta_T = \frac{R_2 R_3 \sin \Delta}{1 - R_2 R_3 \cos \Delta}$$

٦/١/٢- توزيع الشدة الضوئية لهدب فابرى وبيرو للتداخل الضوئى المتعدد عند الانعكاس

The intensity distrbution of multiple-beam Fabry-Perot fringes at reflection:

تعطى المعادلة الآتية محصلة هدب فيزو للتداخل الضوئى المتعدد عند الانعكاس :

$$R_R = R_1 \exp[i(\omega t + \beta_1)] + T_1^2 R_3 \exp[i(\omega t + 2\gamma_1 + \beta_3 + \delta)]$$

$$+ T_1^2 R_2 R_3^2 \exp[i(\omega t + 2\gamma_1 + \beta_2 + 2\beta_3 + 2\delta)] + \ldots$$

Putting $\Delta = \delta + \beta_2 + \beta_3$ and $F = 2\gamma_1 - \beta_1 - \beta_2$ we get

$$R_R = R_1 \exp[i(\omega t + \beta_1)] + T_1^2 R_3 \exp[i(\omega t + \beta_1)] \exp[i(F + \Delta)]$$

$$+ T_1^2 R_2 R_3^2 \exp[i(\omega t + \beta_1)] \exp[i(F + 2\Delta)] + \ldots.$$

$$= \{ R_1 + T_1^2 R_3 \exp[i(F + \Delta)] [1 + R_2 R_3 \exp(i\Delta) + R_2^2 R_3^2 \exp(i2\Delta) + \ldots]\} x$$
$$\exp[i(\omega t + \beta_1)]$$

$$= \left[R_1 + T_1^2 R_3 \exp[i(F + \Delta)] \left(\frac{1 - R_2 R_3 \exp(-i\Delta)}{[1 - R_2 R_3 \exp(i\Delta)][1 - R_2 R_3 \exp(-i\Delta)]} \right) \right] x$$
$$\exp[i(\omega t + \beta_1)]$$

$$= \left[R_1 + T_1^2 R_3 \left(\frac{\exp[i(F + \Delta)] - R_2 R_3 \exp(iF)}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2} \right) \right] \exp[i(\omega t + \beta_1)]$$

$$R_R = \left[R_1 + T_1^{2'} R_3 \left(\frac{\cos(F + \Delta) - R_2 R_3 \cos F + i \sin(F + \Delta) - i R_2 R_3 \sin F}{(1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2} \right) \right] x$$
$$\exp[i(\omega t + \beta_1)]$$

$$= \left[R_1 + T_1^2 R_3 \left(\frac{\cos(F+\Delta) - R_2 R_3 \cos F + i\,[\sin(F+\Delta) - R_2 R_3 \sin F]}{(1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2)} \right) \right] x$$

$$\exp[\, i\,(\omega t + \beta_1)]$$

$$= \left(R_1 + \frac{T_1^2 R_3 [\cos(F+\Delta) - R_2 R_3 \cos F]}{1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2} + i \frac{T_1^2 R_3 [\sin(F+\Delta) - R_2 R_3 \sin F]}{1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2} \right) x$$

$$\exp[\, i\,(\omega t + \beta_1)].$$

$$I_R = \left(R_1 + \frac{T_1^2 R_3 [\cos(F+\Delta) - R_2 R_3 \cos F]}{1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2} \right)^2$$

$$+ T_1^4 R_3^2 \left(\frac{\sin(F+\Delta) - R_2 R_3 \sin F]}{1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2} \right)^2$$

$$= R_1^2 \; \frac{T_1^4 R_3^2 + 2 T_1^2 R_1 R_3 \cos(F+\Delta) - 2 T_1^2 R_1 R_2 R_3^2 \cos F}{1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2}$$

وتعطى المعادلة الأخيرة توزيع الشدة الضوئية I_R لهدب التداخل الضوئى المتعدد عند الانعكاس لأى قيمة للمقدار F وهناك حالتان خاصتان :

أ- عند $F = (2m)\pi$

$$I_R = R_1^2 + \frac{T_1^4 R_3^2 + 2 T_1^2 R_1 R_3 \cos\Delta - 2 T_1^2 R_1 R_2 R_3^2}{1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2}$$

$$= R_1^2 - \frac{T_1^2 R_1}{R_2} + \frac{T_1^4 R_3^2 - T_1^2 R_1 R_2 R_3^2 + (T_1^2 R_1 / R_2)}{1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2}$$

$$= A - B + \frac{C}{1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2}$$

where

$$A = R_1^2$$

$$B = T_1^2 R_1 / R_2$$

and

$$C = T_1^4 R_3^2 - T_1^2 R_1 R_2 R_3^2 + T_1^2 R_1 / R_2$$

ب- وعند $F = (2m + 1)\pi$

$$I_R = R_1^2 + \frac{T_1^4 R_3^2 - 2 T_1^2 R_1 R_3 \cos\Delta + 2 T_1^2 R_1 R_2 R_3^2}{1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2}$$

$$= R_1^2 + (T_1^2 R_1 / R_2) + \frac{T_1^4 R_3^2 - T_1^2 R_1 R_2 R_3^2 - (T_1^2 R_1 / R_2)}{1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2}$$

$$= A + B - \frac{D}{1 - 2 R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2}$$

where

$$D = (T_1^2 R_1 / R_2) - (T_1^4 T_3^2 + T_1^2 R_1 R_2 R_3^2)$$

٦/١/٣- تحليل العناصر المحددة لشكل منحنى توزيع الشدة الضوئية :

Analysis of elements determining the shape of the intensity distribution

نذكر فيما يلى الأنظمة الثلاثة المتكونة بمقياس فابرى وبيرو للتداخل الضوئى :

أ- نظام التداخل الضوئى المتعدد عند الانعكاس ، ويتميز بتكوين هدب حادة معتمة على خلفية مضيئة .

ب- نظام التداخل الضوئى المتعدد عند النفاذ ويتميز بتكوين هدب مضيئة على خلفية معتمة .

جـ- هدب التداخل الضوئي عند الانعكاس المشابهة لهدب التداخل عند النفاذ فى توزيع الشدة الضوئية Transmitted like fringes ذات شدة ضوئية قيمتها أعلى وكذلك خلفيتها بالمقارنة مع الحالة (ب) .

ويمكن إجراء التعميم الآتى على توزيع الشدة الضوئية لأى من الأنظمة الثلاثة المذكورة ، وذلك من الاعتبارات النظرية السابقة .

$$I = A + B + \frac{C}{1 - 2 R_2 R_3 \cos \Delta + R_2^2 R_3^2}$$

فبالنسبة للنظام (ب) عند النفاذ :

$$A = B = O$$
$$C = T_1^2 T_2^2$$

وهى تمثل توزيع الشدة الضوئية الناتجة بتجميع آرى Airy summation ، حيث :

$$I_{max} = \frac{T_1^2 T_2^2}{(1 - R_2 R_3)^2} \qquad \text{for } \Delta = 2\pi S,\ S = 0,1,2,...$$

and

$$I_{min} = \frac{T_1^2 T_2^2}{(1 + R_2 R_3)^2} \qquad \text{for } \Delta = (2S + 1)\pi,\ S = 0,1,...$$

وفى حالة النظام (أ) عند الانعكاس :

$$A = R_1^2$$
$$B = T_1^2 R_1 / R_2$$
$$C = -\left[\mp (T_1^2 R_1 / R_2) - T_1^4 R_3^2 \pm T_1^2 R_1 R_2 R_3^2 \right]$$

ومن الواضح أن توزيع الشدة الضوئية تحدده قيم C, B, A وأن إسهام A هو شدة ضوئية منتظمة لجميع قيم Δ ، وهذا هو أيضا الحالة لإسهام B إذا كانت قيمتى A, B موجبتين ، وبالتالى تكون النتيجة النهائية هى ارتفاع فى الشدة الضوئية لجميع قيم Δ التى سوف تساوى تجميع الشدة الضوئية المقابلة لـ (A + B) . أما إذا كانت قيمة B سالبة فى حين أن |B| لازال أقل من A ، فإن النتيجة النهائية هى ارتفاع فى الشدة الضوئية لجميع قيم Δ مساو لـ (A-B) . ويعطى الحد الأخير فى صيغة التعميم من الشدة الضوئية التى

تتغير بتغير Δ . ومن الواضح أن توزيع الشدة الضوئية للهدب المكونة من مقياس فابرى وبيرو يمثله تجميع ايرى ويعطى قيمة I_{max}، I_{min} ، عند $\Delta = (2S + 1)\pi, \Delta = 2S\pi$ على الترتيب . وفى حالة ما إذا كانت C موجبة فإن هدب التداخل المتكونة عند النفاذ والتى يعبر عنها الحد الأخير سوف تزاح إلى أعلى لجميع قيم Δ بمقدار $(A + B)$ كشدة ضوئية للخلفية . وعندما تكون قيمة B سالبة والفرق موجبا تنخفض الشدة الضوئية للخلفية إلى $A - |B|$. أما إذا كانت C سالبة القيمة فى حين أن كلا من B, A موجبة وأن المرآة المستوية وضعت على محور Δ عند $I = (A+B)$ فإن النتيجة النهائية للحدود الثلاثة سوف تكون خطوطا حادة معتمة على خلفية مضيئة ، التى هى صورة هدب التداخل عند النفاذ المكونة فى المرآة المستوية ويعبر عنها الحد الأخير . وفى هذه الحالة تكون قيمة I_{max} الناتجة من إسهام الحد الأخير أقل من $(A+B)$ ، إنها تساوى :

$$A + B - \left[C / (1 - R_2 R_3)^2 \right]$$

التى تحدث عندما تكون Δ تساوى $(2S+1)\pi$.

وكما سبق أن ذكرنا ، فإن إسهام $(A + B)$ هو شدة ضوئية لجميع قيم Δ لها قيمة ثابتة ، وأن الحد الأخير $\dfrac{C}{(1 - 2R_2 R_3 \cos\Delta + R_2^2 R_3^2)}$ يعطى توزيع الشدة الضوئية لهدب التداخل عند النفاذ التى هى فى هذه الحالة قد طرحت من $(A + B)$ حيث :

$$I_{max} = \frac{C}{(1 - R_2 R_3)^2} \qquad \text{at } \Delta = (2S + 1)\pi$$

وكذلك :

$$I_{min} = \frac{C}{(1 + R_2 R_3)^2} \qquad \text{at } \Delta = 2S\pi$$

كما هو موضح فى الشكل رقم (٦/٢) والنتيجة النهائية هى :

$$I_{max} = R_1^2 + (T_1^2 R_1 / R_2) - \frac{(T_1^2 R_1 / R_2) - (T_1^4 R_3^2 + T_1^2 R_1 R_2 R_3^2)}{(1 + R_2 R_3)^2}$$

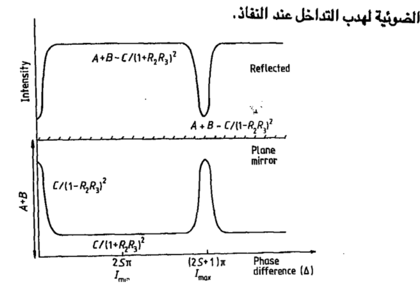
$$= \left(R_1 + \frac{(T_1^2 R_3)}{(1 + R_2 R_3)} \right)^2 \qquad \text{for } \Delta = (2S + 1)\pi$$

وكذلك :

$$I_{min} = R_1^2 + (T_1^2 R_1/R_2) - \frac{(T_1^2 R_1/R_2) - (T_1^4 R_3^2 + T_1^2 R_1 R_2 R_3^2)}{(1 - R_2 R_3)^2}$$

$$= \left(R_1 - \frac{T_1^2 R_3)}{(1 - R_2 R_3)}\right)^2 \qquad \text{for } \Delta = 2S\,\pi$$

وفى حالة حجب الشعاع الأول فإن (A-B=o) وتصبح الحصيلة النهائية هى توزيع الشدة الضوئية لهدب التداخل عند النفاذ.



شكل رقم (٦/٢) : توزيع الشدة الضوئية لهدب التداخل المتعدد عند الانعكاس بحالتيه

٦/١/٤- هدب التداخل الضوئى المتعدد المتكونة من مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر اى المتكونة بالإسفين الضوئي :

Multiple-beam Fizeau fringes by a silvered wedge :

أجرى « تولانسكى Tolansky » عام (١٩٤٨) تحليلا للمتطلبات اللازمة للحصول على هدب التداخل الضوئى لفيزو محددة الموقع المتكونة باستخدام مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر (إسفين ضوئى) . وذكر أن تجميع ايرى Airy summation ينطبق فقط على الحالة التى يكون فيها الوسط المحصور منتظم السمك أما فى حالة وسط متغير السمك كما فى حالة الإسفين الضوئى الذى يحصر شريحة من الهواء فإنه يمكن الحصول على صيغة تقريبية لتجميع ايرى .

وأعطى تولانسكى الفروق الجوهرية للأشعة المكونة لهدب التداخل الضوئى المتعدد فى مالانهاية باستخدام مسطحين ضوئيين متوازيين ، والأشعة المكونة لهدب التداخل الضوئى المتعددة ومحددة الموقع . فالأشعة المتعاقبة والمنعكسة فى حالة الإسفين الهوائى لايتبع فرق الطور بين أى شعاعين متعاقبين متوالية حسابية ، بينما هذه هى الحالة الشريحة المنتظمة السمك وفيها يكون فرق الطور Δ بين كل شعاعين متتاليين لايعتمد على رتبة الأشعة المنعكسة ويعطى من المعادلة :

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} (2nt \cos \theta) + \beta_2 + \beta_3$$

ولكن فى حالة الإسفين الهوائى المفضض تكون قيم تخلف الطور للأشعة المتعاقبة المنعكسة من المجموعة لايتبع متوالية حسابية ، إنما يساوى :

$$\frac{4}{3}\pi S^3 \varepsilon^2 N$$

حيث ε هى زاوية الإسفين ، S هى رتبة الشعاع ، N هى رتبة التداخل الضوئى وتسقط الأشعة عمودية ، وبذلك يكون التخلف فى المسار path lag يساوى :

$$\frac{\lambda}{2\pi}\left(\frac{4}{3}\pi S^3 \varepsilon^2 \frac{2t}{\lambda}\right) = \frac{4}{3} S^3 \varepsilon^2 t$$

وتتطلب الحالة المثلى للحصول على هدب تداخل ضوئى - كما عينها « تولانسكى » - تتطلب استخدام مقياس تداخل ضوئى ذى فجوة صغيرة سمكها t وزاوية الإسفين صغيرة وتساوى ε فتصبح قيمة تخلف الطور صغيرة وتقترب من انطباق شروط تجميع ايرى .

واعتبر « تولانسكى » أن التخلف $\frac{4}{3} S^3 \varepsilon^2$ retardation يساوى $\frac{\lambda}{2}$ (حيث : λ هى طول موجة الضوء) هو الحد المسموح به ليعطى الحد الأقصى لقيمة ε, t

واعتبر " Barakat and Mokhtar " (١٩٦٣) أن الحد المسموح به ليعطى أعلى شدة ضوئية هو $\frac{\lambda}{8}$ وبذلك ينخفض الحد الأقصى لقيمة t .

والتحليل الذى قدمه « تولانسكى » – للظروف اللازمة – للحصول على هدب فيزو التداخل الضوئى محددة الموقع باستخدام إسفين ضوئى يمكن من توسيع مجال تطبيق هذه الهدب الحادة لقياس معاملات الانكسار والإنكسار المزدوج للألياف .

وكما سيوضح لاحقا بالتفصيل ، فإن طريقة قياس معاملات الانكسار للألياف تقوم على وضع شعيرة بين مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر بزاوية صغيرة ويحصران بينهما سائلا غمرت فيه الشعيرة التى توضع فى اتجاه عمودى على حافة الإسفين الضوئى . وكما سبق أن ذكرنا ، أنه يلزم أن تكون كل من قيمة فجوة مقياس التداخل الضوئى interferometric gap nt وزاوية الإسفين صغيرة لتقلل تخلف الطور phase lag بين الأشعة المتعاقبة .

٦/١/٥– هدب تساوى الرتبة اللونية : Fringes of equal chromatic order

تم شرح التداخل الضوئى الناتج من سقوط أشعة متوازية وأحادية طول الموجة على مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر بزاوية α . وظهر أن الهدب تقع على مستوى محدد الموقع قريب من الإسفين الضوئى يسمى سطح فايزنر Feussner .

وقد اكتشف « بروسيل Brossel » عام (١٩٤٧) وجود عدد لانهائى من المستويات المحددة الموقعplanes of localisation عند مسافة x من سطح فايزنر وتعطى المعادلة :

$$x = m\lambda / 2\alpha^{2}$$

وذلك فى حالة سقوط حزمة الأشعة عمودية على سطح مقياس التداخل ، حيث : λ هى طول موجة الضوء المستخدم وتأخذ m القيم ١ ، ٢ ، ٣ ، ....

ويتضح اعتماد قيمة المسافة x على طول موجة الضوء . وبتغيير قيمة λ بالمقدار $d\lambda$ تنتج إزاحة فى موقع المستوى على امتداد المحور x وتساوى : $d\lambda \; (\frac{x}{\lambda})$

تكوين هدب تساوى الرتبة اللونية :

The formation of fringes of equal chromatic order

يكون لكل نقطة على سطح فايزنر Feussner surface سمك معين t ، ويحدث التداخل الضوئى عند النفاذ عندما تكون :

$$N\lambda = 2\, t \cos \theta$$

حيث λ هى طول موجة الضوء المستخدم ، N رتبة التداخل الضوئى وتنطبق نفس الشروط على طول موجة آخر (λ_1) عند الرتبة رقم (N + 1) .... ولموجة الضوء λ_m عند الرتبة (N + m) .

وينطبق هذا المفهوم فى حالة وجود الأطوال الموجية منفصلة عن بعضها أو فى حالة وجودها فى طيف مستمر continuous spectrum . وحيث إن سطح فايزنر لايعتمد على طول موجة الضوء فإن هذه الهدب النقطيةpoint fringes التى تنتمى إلى أطوال موجية مختلفة تقع على بعضها البعض ، ولايمكن رؤيتها على سطح فايزنر إلا عند القيم الصغيرة جدا للرتبة N . فإذا تم إسقاط سطح فايزنر على فتحة مطياف باستخدام عدسة لالونية أو بوضع مقياس التداخل الضوئى قريبا من الفتحة ، فإن هذه الفتحة تختار خطا من هذا السطح ، ويتغير السمك t عامة لنقط هذا الخط .

وباعتبار الخط مكونا من عدد لانهائى من هذه الهدب النقطية ، فإن قوة تفريق المطياف تفصل كل مجموعة لتظهر متفرقة فى المستوى الطيفى spectral plane . وباعتبار أى نقطتين على الخط الذى تم اختياره بواسطة فتحة المطياف يقابلان السمكين t + dt, t ، فإنه ينتج لنفس رتبة التداخل الضوئى هدبتان تظهران فى المستوى الطيفى عند الطولين الموجيين λ ، $\lambda + d\lambda$ حيث :

$$t/\lambda = (t + dt) / (\lambda + d\lambda) = \text{constant} \times N.$$

وإذا تغير السمك t بالتدريج فى المدى dt ينتج منحنى مستمر لكل رتبة من رتب التداخل الضوئى . وعند التغير الرأسى فى قيمة t التى تحدث فى حالة درجات سلم ، تظهر تغيرات مفاجئة وغير مستمرة . وتظهر مجموعة هدب التداخل الضوئى اللونية فى مستوى الطيف ذى رتبة التداخل الواحدة لكل مكون للمجموعة - هذه هى هدب تساوى الرتب اللونية التى اكتشفها « تولانسكى » سنة (١٩٤٥) .

شروط تكوين هدب تساوى الرتبة اللونية The condition for formation :

تقع هدب التداخل الضوئى أحادية اللون محددة الموقع على أحد مستويات بروسيل الأساسية Principal Brossel planes ، وعند استخدام ضوء أبيض وإسقاط هذه الهدب على فتحة المطياف ، تظهر هدب تداخل لونية عند المستوى الطيفى ، وتكون واضحة ومحددة المعالم فى مساحة محدودة جدا تعتمد على امتداد الموقع فى الفراغ وكذلك على البعد البؤرى للعدسة اللالونية التى تستخدم فى إسقاط الضوء على فتحة المطياف .

وذكر « بركات Barakat » سنة (١٩٥٧) أن هدب تساوى الرتبة اللونية تتكون واضحة ومحددة المعالم فقط فى المستوى الطيفى إذا كان موقع المستوى الذى يتم تكوين الهدب عليه للنظام أحادى اللون لايعتمد على طول موجة الضوء المستخدمة ، أى لايتغير بتغير طول موجة الضوء . وبتطبيق هذه النتيجة على الهدب أحادية طول الموجة المحددة على سطح فايزنر ذات الرتبة الصفرية (m = صفر) تكون هدب تساوى الرتبة اللونية المتكونة فى المستوى الطيفى كلها واضحة ومحددة المعالم .

شكل هدب تساوى الرتبة اللونية

The shape of fringes of equal chromatic order

من الواضح الآن أن شكل الهدب الناتجة تعتمد أساسا على كيفية تغيير السمك t لنقط الخط المختار بواسطة فتحة المطياف . وإذا اعتبرنا أن هذا الخط يمثل المحور Y فتكون t هى دالة فى y ، أى أن :

$$t = f(y)$$

ويكون المستوى الطيفى spectral plane هو المستوى (λ, y) . وتنتج هدب تساوى الرتبة اللونية مباشرة من تحويل المعادلة $t = f(y)$ من المستوى (t,y) إلى المستوى (λ, y) باستخدام :

$$N\lambda = 2\ nt \cos \theta$$

وذلك فى حالة نفاذ الأشعة مع إهمال التغير فى الطور عند الانعكاس ، ويعتمد شكل الهدب الناتجة على علاقة التحويل ، وفى حالة الهدب المتكونة من الأشعة المنعكسة حيث المعادلة هى :

$$(N + \frac{1}{2})\ \lambda = 2nt \cos \theta$$

وتكون الهدب المعتمة لها نفس الشكل كما فى حالة نفاذ الأشعة .

ويدخل عاملان فى هذا الشأن :

أ- قوة تكبير العدسة المستخدمة فى إسقاط الهدب على فتحة المطياف وتكبير هذا المطياف .

ب- قوة تفرق المطياف .

ويكون تأثير تكبير العدسة على الهدب اللونية فى اتجاه الفتحة وليس لها تأثير فى الاتجاه العمودى أى محور λ حيث يكون التأثير لقوة تفرق الجهاز . ويمكن استخدام مطياف المنشور أو محزوز الحيود ، وفى الحالة الأولى تتبع قوة التفرق D صيغة هارتمان Hartman's formula :

$$\lambda = \lambda_0 + B / (D - D_0)$$

حيث D_0, B, λ_0 مقادير ثابتة .

بينما محزوز الحيود يعطى تفرقا خطيا linear dispersion :

$$D = K\lambda$$

وبتحديد تناول ومعالجة الحالة فى إطار التفرق الخطى وبالتعويض عن t, λ بمعلومية Y, D فى المعادلة الأساسية :

$$N \lambda = 2 n \cos \theta \, f\left(\frac{Y}{m}\right)$$

ينتج :

$$D = (2K / n) \, f\left(\frac{Y}{n}\right)$$

وذلك لأى هدبة عند السقوط العمودى فى الهواء .

والمعادلة الأخيرة هى معادلة مجموعة من الهدب لها تكبير يتناقص عندما تأخذ N القيم ١، ٢، ٣، .. ويتضح من المعادلة السابقة أن أى هدبة فى المستوى (D, Y) هى صورة مكبرة لقطاع من مقياس التداخل الضوئى تم اختياره وتحديده بواسطة فتحة المطياف . وحيث إن تأثير التكبير غير موحد عبر المحورين Y, D فتنتج صورة مشوهة لاختلاف التكبير فى أحد المحورين عنه فى المحور الآخر distorted image ، وكمثال على ذلك تنتج من مقطع دائرى هدب على هيئة قطع ناقص . وعند استخدام المطياف ذى المنشور ينشأ سبب آخر للتشويه وذلك نتيجة عدم انتظام التفرق non-linearity .

شكل هدب تساوى الرتبة اللونية المتكونة باستخدام إسفين

The shape of fringes of equal chromatic order formed by an air wedge :

إذا كانت α هى زاوية الإسفين الهوائى أى الذى يحصر شريحة من الهواء air wedge والذى يوضع بحيث يكون أحد مكوناته موازيا لمستوى فتحة المطياف ، ε هى البعد الضوئى optical separation للمسطحين الضوئيين عند نقطة لقائهما ، فتكون معادلة الجزء المختار من الإسفين بواسطة فتحة المطياف :

$$(t - \varepsilon) / y = \tan \alpha$$

هى دالة خطية فى t

وبالتعويض فى المعادلة الأساسية للتداخل الضوئى عند النفاذ حيث تسقط الأشعة عمودية :

$$N\lambda = 2t$$

$$N\lambda = 2\tan\alpha\, y + 2\varepsilon$$

وبذلك تكون :

$$Y = \cot\alpha \left(\frac{N\lambda}{2} - \varepsilon\right)$$

$$= \frac{N\cot\alpha}{2}\left(\lambda - \frac{2\varepsilon}{N}\right) \qquad (6.5)$$

وتمثل المعادلة (٦-٥) مجموعة خطوط غير متوازية يميل كل منها بزاوية تساوى ، $\frac{N\cot\alpha}{2}$ حيث N عدد صحيح . ولمجموعة الخطوط نقطة مشتركة عند $(\theta, -\varepsilon\cot\alpha)$ وبزيادة رقم N تقترب الهدب من الاتجاه العمودى للمحور y .

حالة حلقات نيوتن : The case of Newton's rings

توضع عدسة على مسطح ضوئى مغطى بطبقة نصف شفافة من الفضة . وتكون معادلة الدوائر فى المستوى (t,y) هى :

$$[t - (R + \varepsilon)]^2 + y^2 = R^2$$

حيث R هى نصف قطر التكور ، ε هى البعد بين العدسة والمسطح الضوئى عند نقطة الالتقاء .

ويتم اختيار نقطة الأصل بحيث يكون :

$$t = \varepsilon \quad \text{at} \quad y = o$$

وبتحويل المعادلة السابقة إلى المستوى (λ, y) نجد أن :

$$\left(\lambda - \frac{2(R+\varepsilon)}{N}\right)^2 \left(\frac{4R^2}{N^2}\right)^{-1} + \frac{y^2}{R^2} = 1$$

وتمثل هذه المعادلة مجموعة قطع ناقصة مركزها هو $(2(R+\varepsilon)/N, 0)$ ، ويكون نصف المحور الأكبر ونصف المحور الأصغر هما 2R/N, R عندما تأخذ N أرقام صحيحة وموجبة .

وحيث إن قيم t صغيرة بالمقارنة بقيم R ، فإنه يمكن إهمال قيمة t^2 ، والمعادلة الناتجة تمثل مجموعة قطع مكافئة Parabolas ، كما توصل إلى ذلك « تولانسكى » وتكون هذه الهدب محدبة ناحية البنفسجى .

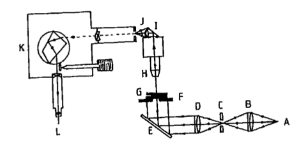
وباستخدام عدسة مستوية – محدبة مع مسطح ضوئى بحيث يكون سطحها المحدب مرتكز على هذا المسطح تكون معادلة الهدب هى :

$$\left(\lambda + \frac{2\,(R - \varepsilon)}{N}\right)^2 \left(\frac{4R^2}{N^2}\right)^{-1} + \frac{y^2}{R^2} = 1$$

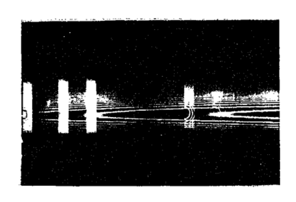
حيث ε هى الـ sagitta للسطح المنحنى (ذى نصف القطر R) بالنسبة للمسطح الضوئى .

وهذه هى معادلة مجموعة قطع ناقصة ellipses مراكزها هى $(\frac{2\,(R-\varepsilon)}{N}, o)$ وهى تكون محدبة ناحية الأحمر . ولذلك فإنه فى حالة وجود هضبة أو ارتفاع على سطح أحد مكونات مقياس التداخل تكون هدب تساوى الرتبة اللونية محدبة تجاه البنفسجى وفى حالة وجود انخفاض أو وادى valley تكون الهدب محدبة ناحية الأحمر . والشكل رقم (٦/٣) يبين النظام البصرى المستخدم لتكوين هدب تساوى الرتبة اللونية .

والشكل رقم (٦/٤) يبين كيفية تكوين هدب تساوى الرتبة اللونية من هدب تساوى السمك fringes of equal thickness ، وتنتج هدب تساوى الرتبة اللونية على هيئة قطع ناقصة من مقياس تداخل ضوئى مكون من عدسة ومسطح ضوئى ، حيث تتكون مجموعة من دوائر متحدة المركز متساوية السمك . وذلك عند استخدام ضوء أحادى طول الموجة صادر من مصباح الزئبق .



شكل رقم (٦/٣) : النظام البصرى المستخدم لتكوين هدب التداخل اللونية متساوية الرتبة عند النفاذ A ، مصدر ضوئى نقطى ، B عدسة ، C فتحة دائرية ، D عدسة ، E سطح عاكس ، F قاعدة ميكروسكوب ، G مقياس التداخل الضوئى – إسفين ، H شيئية الميكروسكوب ، I منشور قائم الزاوية ، J عدسة إسقاط ، K مطياف ، L الكاميرا (من Barakat and El-Hennawi, 1971)



شكل رقم (٦/٤) : يوضح كيفية تكون هدب التداخل اللونية ذات الرتبة الواحدة من هدب تساوى السمك

٦/٢- تطبيق هدب التداخل الضوئى المتعدد لتعيين معاملات انكسار الألياف

Application of multiple-beam Fizeau fringes to the determination of refractive indices of fibres :

قدم القسم الأول من هذا الفصل نظرية تكوين وموقع وتوزيع الشدة الضوئية لهدب فيزو للتداخل الضوئى المتعدد وكذلك المتكونة بواسطة إسفين ضوئى Wedge وهدب تساوى الرتبة اللونية ، وسوف ندرس فى هذا القسم تطبيق هذه الهدب لدراسة الألياف ، ويتضمن نظرية استخدام التداخل الضوئى لتعيين معاملات انكسار الألياف .

٦/٢/١- نظرية هدب فيزو للتداخل الضوئى لدراسة الألياف ذات المقاطع العرضية المنتظمة

Theory of Fizeau fringes applied to fibres with regular transverse sections.

اشتق « بركات Barakat » (١٩٧١) معادلات رياضية لشكل هدب فيزو للتداخل الضوئى عندما تعبر شعيرة ذات مقطع عرضى دائرى ومغموره فى سائل محصور فى إسفين ضوئى wedge ، واستنتج معادلات لتعيين معاملات الانكسار للألياف المتجانسة والتى تتكون من لب وقشرة ، وذلك من إزاحة الهدب داخل الشعيرة . واستنتج معادلة للألياف المتجانسة والمتكونة من طبقة واحدة .

ونوضح فيما يلى المعادلات الرياضية الخاصة بمجموعة هدب فيزو للتداخل الضوئى عندما تعبر شعيرة ذات مقطع عرضى دائرى ومتكونة من لب وقشرة . وعند دراسة الألياف بالتداخل الضوئى توضع الشعيرة داخل الإسفين الضوئى wedge المكون من مسطحين ضوئيين مفضضين ، يميل أحدهما على الآخر ويحصران سائلا . ويكون محور الشعيرة عموديا على حافة الإسفين edge of the wedge ، ويفرض أن أحد المسطحين الضوئيين المفضضين يلامس سطح الشعيرة . ويبين الشكل رقم (٦/٥) مقطع عرضى لشعيرة إسطوانية الشكل نصف قطرها r_f ، وتتكون من لب معامل انكسار مادته ونصف قطره r_c وقشرة معامل انكسار مادتها n_s ، وقد غمرت هذه الشعيرة فى سائل معامل انكساره n_L يحصره إسفين ضوئى wedge ، وسقطت حزمة ضوئية ذات طول موجى λ فى لاتجاه $\overleftarrow{DC}, \overleftarrow{BA}$ عمودية على المسطح الضوئى السفلى وكانت زاوية الإسفين ε صغيرة . وتمثل t سمك فجوة مقياس التداخل الضوئى ، وقد اختير محور الشعيرة ليكون المحور Z وحافة الإسفين تكون موازية للمحور X . وفى هذا الصدد نأخذ فى الاعتبار منطقتين :

أ- عندما تكون :

$$X^2 + Y^2 = r_c^2$$

حيث :

$$O \le x \le r_c$$

ب- عندما تكون :

$$X^2 + Y^2 = r_f^2$$

حيث :

$$r_c \le x \le r_f$$

وفيما يلى اشتقاق شكل الهدب فى المستوى (z, x) وهو مستوى تكون صورة هدب التداخل الضوئى plane of the interferogram ، وتعطى المعادلة الآتية طول المسار الضوئى (OPL) للشعاع $\overleftarrow{BA}$ الذى يعبر الشعيرة فى المنطقة : $o \le x \le r_C$

$$OPL = (t - 2Y_2) n_L + 2(Y_2 - Y_1) n_s + 2 Y_1 n_c \qquad (6.6)$$

وللهدبة ذات الرتبة N

$$N\lambda = 2n_L t + 4Y_2(n_s - n_L) + 4Y_1(n_c - n_s) \qquad (6.7)$$

حيث :

$$t = Z \tan \varepsilon$$

و ε هى زاوية الإسفين ، ويمثل مسقط حافة الإسفين نقطة الأصل للمحور Z .

ومن المعادلة رقم (٦-٧)

$$N\lambda - 2n_L t = 4Y_2(n_s - n_L) + 4Y_1(n_c - n_s)$$

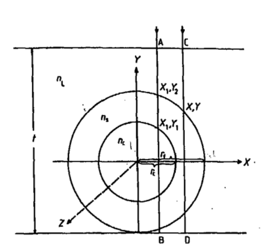
$$2n_L \tan\varepsilon \left(\frac{N\lambda}{2n_L \tan\varepsilon} - Z \right) = 4Y_2(n_s - n_L) + 4Y_1(n_c - n_s) \qquad (6.8)$$

وبنقل نقطة الأصل إلى $(N\lambda / 2n_L \tan\varepsilon, o)$ على المستوى (Z, X) ينتج :

$$2n_L \tan\varepsilon \;\; Z = 4Y_2(n_s - n_L) + 4Y_1(n_c - n_s)$$

$$= 4(n_s - n_L)(r_f^2 - X^2)^{½} + 4(n_c - n_s)(r_f^2 - X^2)^{½} \qquad (6.9)$$

وتقيس Z إزاحة الهدبة ، ذات الرتبة N ، فى الشعيرة ، اعتبارا من موقع هذه الهدبة فى منطقة السائل ، ويكون اتجاه Z نحو رأس الإسفين wedge apex .



شكل رقم (٦/٥) : يوضح مقطعا عرضيا فى شعيرة إسطوانية نصف قطرها r_f ، معامل انكسار لبهاb n_c ونصف قطره r_c ومعامل انكسار قشرتها n_s غمرت فى إسفين مفضض يحصر سائلا معامل انكساره n_L (من Barakat, 1971)

إذا عبرنا عن المسافة بين هدبتين متتاليتين فى منطقة السائل بالرمز ΔZ ، فإن المعادلة الآتية تعطى الزاوية ε :

$$\tan \varepsilon = \lambda / 2 n_L \Delta Z$$

$$\frac{Z}{\Delta Z}\frac{\lambda}{4} = (n_s - n_L)(r_f^2 - X^2)^{1/2} + (n_c - n_s)(r_c^2 - X^2)^{1/2} \qquad (6.10)$$

At $X = 0$

$$\frac{Z}{\Delta Z}\frac{\lambda}{2} = (n_s - n_L)\, 2r_f + (n_c - n_s)\, 2r_c$$

$$= (n_s - n_L)\, t_f + (n_c - n_s)\, t_c$$

where $t_f = 2r_f$ and $t_c = 2r_c$ and

$$\frac{Z}{\Delta Z}\frac{\lambda}{2} = n_s t_s + n_c t_c - n_L t_f \qquad (6.11)$$

where $t_s = (t_f - t_c)$.

$$\frac{Z}{\Delta Z}\frac{\lambda}{2} = (n_a - n_L)\, t_f \qquad (6.12)$$

حيث :

$$n_a = n_c t_c / t_f + n_s t_s / t_f$$

ولتطبيق هذه العلاقات عمليا تقاس $Z / \Delta Z$ ، وبمعرفة t_f ، n_L يمكن حساب n_a ، وبتعيين n_s باستخدام طريقة الحد الفاصل لبيك Becke-line وحساب t_s/t_f باستخدام طريقة الفصل بالأصباغ differential staining يمكن حساب n_c .

وبتعيين قيمة إزاحة الهدبة $Z^{\parallel}$ بالنسبة إلى المسافة بين هدبتين متتاليتين فى منطقة السائل ΔZ يمكـن تعيين $n_a^{\parallel}$ من المعادلة الآتية – Barakat and Hindeleh, 1964a – :

$$n_a^{\parallel} = n_L + \frac{Z^{\parallel}}{\Delta Z} \frac{\lambda}{2t_f} \qquad (6.13)$$

ولتعيين قيمة $n_a^{\perp}$ تطبق المعادلة :

$$n_a^{\perp} = n_L + \frac{Z^{\perp}}{\Delta Z} \frac{\lambda}{2t_f} \qquad (6.14)$$

وفى حالة الألياف المتجانسة التركيب يكون :

$$n_S = n_C = n$$

ويعطى العلاقة الآتية معامل الانكسار

$$\frac{Z}{\Delta Z} \frac{\lambda}{2} = (n - n_L)\, t_f \qquad (6.15)$$

وفيما يلى نوضح طريقة استنتاج هدب فيزو للتداخل الضوئى عندما تعبر شعيرة إسطوانية نصف قطرها r_f ومغمورة فى سائل معامل انكساره n_L ، وكانت الشعيرة مكونة من قشرة معامل انكسار مادتها n_s ولب معامل انكسار مادته n_c ونصف قطره r_c .

وسنبدأ أولا باشتقاق المعادلة الرياضية لشكل الهدبة فى منطقة القشرة مع ملاحظة أنها لاتعتمد على خواص لب الشعيرة (شكل ٦/٦) وبإهمال انكسار الأشعة عبر قشرة الشعيرة ولبها ويأخذ المنطقة $r_c \leq x \leq r_f$ فقط فى الاعتبار ينتج :

$$N\lambda = 2n_L t + 4\, Y\, (n_s - n_L) \qquad (6.16)$$

ويلاحظ أن الرتبة فى منطقة السائل تحقق المعادلة :

$$N\lambda = 2\ n_L t_1$$

وينتج عن ذلك أنه فى حالة $n_s > n_L$ تكون الفجوة الضوئية t_1 فى مقياس التداخل الضوئى فى منطقة السائل – تكون أكبر منها فى منطقة القشرة التى تعطيها المعادلة رقم (٦-١٦) . وتكون إزاحة الهدبة فى منطقة القشرة فى حالة $n_s > n_L$ فى اتجاه تناقص t وبذلك تأخذ المعادلة الصيغة الآتية :

$$N\lambda - 2\ n_L Z \tan\varepsilon = 4\,(n_s - n_L)\,(r_f^2 - X^2)^{1/2}$$

$$-\left(Z - \frac{N\lambda}{2n_L \tan\varepsilon}\right) = \frac{4\Delta Z}{\lambda}\,(n_s - n_L)\,(r_f^2 - X^2)^{1/2}$$

بالتحويل إلى النقطة $(N\lambda/2\ n_L \tan\varepsilon, o)$ على المستوى (Z, X)

$$-Z = \frac{4\Delta Z}{\lambda}\,(n_s - n_L)\,(r_f^2 - X^2)^{1/2} \qquad (6.17)$$

Z هى إزاحة الهدبة مقاسة من نقطة على امتداد الهدبة الموجودة فى منطقة السائل حيث : $Z = N\Delta Z$ على المحور Z .

وتعطى المعادلة الآتية شكل الهدبة ذات الرتبة N فى منطقة القشرة :

$$Z^2\left[\left(\frac{4\Delta Z}{\lambda}\right)^2 (n_s - n_L)^2\ \ r_f^2\right]^{-1} + X^2/r_f^2 = 1 \qquad (6.18)$$

وهى تمثل قطعا ناقصا نصف محورة الأكبر ونصف محوره الأصغر هما r_f, $(4\Delta Z/\lambda)\,(n_s - n_L)\,r_f$ فى المستوى (z,x) . ويتحدد اتجاه إزاحة الهدبة Z بقيم معاملات الانكسار إما أن تكون $n_s > n_L$ أو $n_s > n_L$. ففى حالة $n_s > n_L$ تمثل الهدبة بنصف قطع ناقص فى اتجاه رأس الإسفين ، بينما فى حالة $n_s < n_L$ تكون إزاحة الهدبة فى ناحية الهدبة الموجودة فى منطقة السائل وعكس اتجاه رأس الإسفين wedge apex. ويبين الشكل (٦/٦أ، ب) هدب التداخل الضوئى التى تتبع معادلة قطع ناقص فى حالتى $(n_s - n_L) > o$, $(n_s - n_L) < o$ على الترتيب . وعند زيادة قيمة $(n_s - n_L)$ فإن شكل الهدب تظل نصف قطع ناقص تجاه رأس الإسفين مع اطراد زيادة $(1 - \frac{1}{A^2})$ حيث :

$$A = \left(\frac{4\Delta Z}{\lambda}\right)(n_s - n_L)$$

وعند $A = 1$ تأخذ الهدبة شكل نصف دائرة ، وعند استمرار نقصان قيمة $(n_S - n_L)$ فإن نصف المحور الأكبر للقطع الناقص يصبح نصف محوره الأصغر .

وعندما تكون $(n_S = n_L)$ تأخذ الهدبة شكل الخط المستقيم فى منطقة القشرة أى تكون على امتداد الهدبة الموجودة فى منطقة السائل . وعند استمرار زيادة قيمة n_L تصبح الهدبة على شكل قطع ناقص ولكن من الناحية الأخرى للهدبة الموجودة فى منطقة السائل أى فى عكس اتجاه رأس الأسفين الضوئى .

وفى حالة شعيرة إسطوانية تتكون من قشرة ولب مغمورة فى سائل معامل انكساره n_L يساوى معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة n_S ، وكان معامل انكسار مادة لب الشعيرة ثابتا ، فإن شكل هدب فيزو للتداخل الضوئى المتعدد خلال منطقة لب الشعيرة فى المستوى(z,x) تعطيه المعادلة :

$$Z^2\left[\left(\frac{4\Delta Z}{\lambda}\right)^2 (n_c - n_L)^2 r_c^2\right]^{-1} + X^2 / r_c^2 = 1 \qquad (6.19)$$

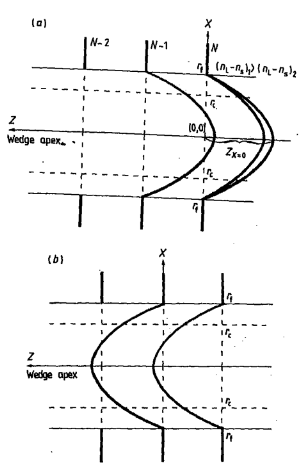
ويكون نصف المحور الأكبر ونصف المحور الأصغر هما r_C, Br_C على الترتيب .

حيث :

$$B = \left(\frac{4\Delta Z}{\lambda}\right)(n_c - n_L)$$

ولقد سبق دراسة تأثير قيمة $(n_S - n_L)$ فى منطقة القشرة ، ويوجد تأثير مماثل للمقدار $(n_C - n_L)$ فى المنطقة $O \leq x \leq r_C$ على شكل الهدب ، وذلك فى حالة شعيرة مغمورة فى سائل له نفس معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة .

ويمكن ملاحظة تأثير تغير زاوية الإسفين الضوئى ε على شكل الهدب من قيم نصف المحور الأكبر ونصف المحور الأصغر وهما $r_C, 2\,(n_C - n_L)\, r_C / n_L \tan \varepsilon$ على الترتيب . وعندما تقل الزاوية ε فإن نصف المحور الأكبر يزداد وكذلك تزيد قيمة ΔZ ، ونحصل على تأثير مماثل عندما تقل قيمة n_L .



شكل رقم (٦/٦) : يوضح شكل هدب التداخل الضوئى عند (a) $(n_S - n_L)$ > صفرا ،
(b) $(n_S - n_L)$ < صفرا .

دعنا نفترض أنه توجد مجموعة من هدب التداخل الضوئى ذات الرتب N+2, N+1, N كما فى الشكل رقم (٧/٦) وتقاس مواقع نقط الأصل للهدب :

$$O_N \equiv \left(\frac{N\lambda}{2n_L \tan\varepsilon} \ , 0 \right)$$

$$O_{N+1} \equiv [(N+1)\,\Delta Z, 0]$$

$$O_{N+2} \equiv [(N+2)\,\Delta Z, 0]$$

من رأس الإسفين الضوئى .

ويدل هذا على أن مجموعة الهدب وشكلها وموقعها تقدم طريقة مسح للكشف عن أى عيوب أو اختلافات فى المقطع العرضى على طول الشعيرة ، ويمكن إجراء مسح بين مواقع

هدبتين بتغير زاوية الإسفين ، إذ يتم تحرك الهدبة لتغطى هذه المسافة وتوفر أية معلومات تظهرها عن اختلافات فى مقطع الشعيرة ، وتتكون الهدبة النقطية عند الحد الفاصل بين السائل والقشرة نتيجة الشعاع المماس لسطح الشعيرة الإسطوانية فى الحالة الأولى ، أما فى حالة المضاهاة فالهدبة النقطية تكون نتيجة لشعاع المماس لسطح لب الشعيرة . فانعكاسة السطح الفاصل تكون عالية للغاية عند زوايا سقوط قريبة من $\frac{\pi}{2}$ ، وبالتالى تكون الشدة الضوئية النافذة ضئيلة للغاية لجميع قيم $(n_s - n_L)$ أو $(n_c - n_L)$ عند المضاهاة .

وينتج عن ذلك نقصان حاد فى الشدة الضوئية للهدبة يظهر لانقطاعه عند النقطة التى تحدد السطح الفاصل .

وتعطى المعادلة الآتية شكل هدب التداخل الضوئى المتعدد ذى الرتبة N خلال شعيرة مكونة من قشرة ولب :

$$Z = \frac{4\Delta Z}{\lambda}(n_s - n_L)(r_f^2 - X^2)^{1/2} + \frac{4\Delta Z}{\lambda}(n_c - n_s)(r_c^2 - X^2)^{1/2} \qquad (6.20)$$

وتقاس إزاحة الهدبة من النقطة $(N Z, o)$ تجاه رأس الإسفين الضوئي :

$$Z = f_1(X) + f_2(X)$$

والمعادلة التى تعطى شكل الدالة $Z = f_1(X)$ هى :

$$(Z^2 / A^2 r_f^2) + (X^2 / r_f^2) = 1 \qquad (6.21)$$

حيث :

$$A = \frac{4\Delta Z}{\lambda}(n_s - n_L)$$

بينما شكل الدالة $Z = f_2(X)$ فيعطى من المعادلة :

$$(Z^2 / B^2 r_c^2) + (X^2 / r_c^2) = 1 \qquad (6.22)$$

حيث :

$$B = \frac{4\Delta Z}{\lambda}(n_c - n_s)$$

ويمثل إسهام الدالتين $f_2(x), f_1(x)$ فى تكوين الهدبة عبر الشعيرة بيانيا ثم يتم جمع الإسهامين عندما تكون $n_c > n_s > n_L$ ، ويكون نصفا القطعتين الناقصين على جانب واحد من الهدبة فى منطقة السائل وفى اتجاه رأس الإسفين .

أما فى حالة $n_L > n_S$, $n_C > n_S$ فإن :

$$Z = f_2(x) - f_1(x)$$

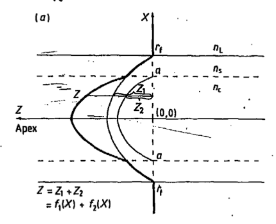
ويمثل الشكلان رقم (٦/٧/أ) ، (٦/٧/ب) شكل الهدبة عبر لب وقشرة فى الحالتين المذكورتين .

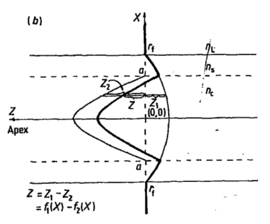
ومن الشكل رقم (٦/٧/أ) تعطى المعادلة الآتية قيمة الإزاحة Z عند x = o :

$$Z_{x=0} = \frac{4\,\Delta Z}{\lambda}\,[(n_s - n_L)\,r_f + (n_c - n_s)\,r_c] \qquad (6.23)$$

ومن شكل (٦/٧/ب)

$$Z_{x=0} = \frac{4\,\Delta Z}{\lambda}\,[(n_c - n_s)\,r_c - (n_L - n_s)\,r_f] \qquad (6.24)$$





شكل رقم (٦/٧) : يوضح شكل هدب التداخل عبر لب وقشرة فى حالة

$n_s > n_c$, $n_s > n_L$ (b), $n_s < n_c$, $n_L < n_s$ (a)

٢/٢/٦- الألياف منتظمة المقطع العرضى متعددة الطبقات

Multilayer fibres with regular transverse sections :

تم الحصول على المعادلة الرياضية لشكل هدب فيزو للتداخل الضوئى المتعدد عندما تعبر شعيرة إسطوانية متعددة الطبقات ، وذلك بإضافة حدود مناسبة لمعادلة فرق المسار الضوئى (OPL) المعطاة بالمعادلة رقم (٦-٦) ، وتمثل هذه الحدود إسهامات كل طبقة من الطبقات المكونة للشعيرة ، ونتجت المعادلة الآتية :

$$\left(\frac{Z}{\Delta Z}\right)_x \frac{\lambda}{2} = 2\left(\sum_{k=1}^{m} n_k r_k - \sum_{k=1}^{m-1} n_k r_{k+1} - n_L r_1\right) \qquad (6.25)$$

حيث n_k تمثل معامل انكسار الطبقة k ، وكذلك فإن :

$$K = 1,2, \ldots\ldots m$$

و r_k هو نصف قطر هذه الطبقة ، n_L هو معامل انكسار سائل الغمر ، r_1 هو نصف قطر الطبقة الخارجية للشعيرة . وقد حصل كل من "El-Nicklawy and Fouda" (١٩٨٠) و"Hamza and Kabeel" (١٩٨٦) على هذه المعادلة ، وعالج الأخيران مشكلة وجود عدم انتظام فى المقطع العرضى للشعيرة .

واستنتج "El-Hennawi" (١٩٨٨ a,b,c) معادلة لشكل هدب فيزو للتداخل الضوئى التى تعبر شعيرة إسطوانية متكونة من طبقة واحدة وطبقتين ومتعددة الطبقات ، أخذا فى الاعتبار انكسار الشعاع الضوئى داخل الشعيرة ، وتكون المعادلة فى حالة الشعيرة متعددة الطبقات هى :

$$\left(\frac{Z}{\Delta Z}\right)_x \frac{\lambda}{2} = 2\left(\sum_{k=1}^{m} (n_k^2 r_k^2 - n_L^2 X^2)^{1/2} - \sum_{k=1}^{m-1} (n_k^2 r_{k+1}^2 - n_L^2 X^2)^{1/2} - n_L (r_1^2 - X^2)^{1/2}\right) \qquad (6.26)$$

حيث m هى عدد الطبقات المكونة للمقطع العرضى للشعيرة . وعند x = o لايوجد انكسار وتؤول المعادلة رقم (٦ - ٢٦) إلى المعادلة رقم (٦-٢٥) .

٦/٢/٣- تطبيق هدب فيزو للتداخل الضوئى على الألياف ذات المقاطع العرضية غير المنتظمة

Multiple-beam Fizeau fringes applied to fibres with irregular transverse-sections:

أولا : الألياف المتجانسة التركيب (Hamza et al., 1985a)
Homogeneous fibres :

شرح "Simmens" (١٩٥٨) طريقة باستخدام جهاز بابينيت Babinet compensator لتعيين معامل الانكسار المزدوج للأجسام التى لها وزن ثابت بالنسبة لوحدة الأطوال ، ولكن لها مقطع عرضى غير منتظم الشكل . ولتعيين معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف ذات المقاطع العرضية غير المنتظمة قدم "Hamza" (١٩٨٠) طريقة باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى والميكروسكوب الالكترونى الماسح . وفيما يلى شرح لتطبيق هدب فيزو للتداخل الضوئى المتعدد لدراسة الألياف المتجانسة التركيب والتى لها مقطع عرضى غير منتظم .

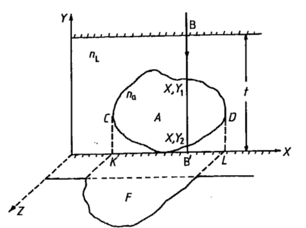
ويبين الشكل رقم (٦/٨) شعيرة غير منتظمة المقطع العرضى موضوعة فى إسفين ضوئى مكون من مسطحين ضوئيين مفضضين ، يميل أحدهما على الآخر ، ويحصران بينهما سائلا غمرت فيه الشعيرة ، وتعطى المعادلة الآتية مساحة مقطع الشعيرة A فى المستوى (X,Y) :

$$A = \int_{k}^{L} (Y_1 - Y_2)\, dX \qquad (6.27)$$

حيث : Y_1, Y_2 هما نقطتا تقاطع لخط الماسح scanning line ، والذى يوازى المحور Y مع محيط مقطع الشعيرة . ويقع هذا الخط بين النقطتين C ,D اللتين تقابلان النقطتين L ,K على المحور X .

وتعطى المعادلة الآتية طول المسار الضوئى OPL للشعاع $\overrightarrow{BB'}$

$$OPL = [\, t - (Y_1 - Y_2)]\, n_L + (Y_1 - Y_2)\, n_a \qquad (6.28)$$



شكل رقم (٦/٨) : يوضح شعيرة غير منتظمة المقطع العرضى غمرت فى إسفين ضوئى مفضض يحصر سائلا تمثل A مساحة مقطع الشعيرة ، n_L معامل انكسار سائل الغمر (من Hamza et al., 1985 a)

وبالنسبة للهدبة ذات رتبة التداخل N يمكن كتابة المعادلة :

$$N\lambda = 2n_L t + 2\,(n_a - n_L)\,(Y_1 - Y_2) \qquad (6.29)$$

وبالتعويض عن t بالمقدار :

$$t = Z \tan \varepsilon$$

وبتحويل نقطة الأصل للنقطة $(N\lambda/2\, n_L \tan \varepsilon, o)$ على المستوى (Z,X) نحصل على :

$$n_L \tan \varepsilon\, Z = (n_a - n_L)\,(Y_1 - Y_2) \qquad (6.30)$$

حيث Z هى القيمة الجديدة بعد نقل الأصل ، وهى تقيس إزاحة الهدبة ذات الرتبة رقمN فى منطقة الشعيرة عنها فى منطقة السائل .

وبإجراء التكامل ليشمل المنطقة $K \geq X \geq L$ تنتج المساحة F المحصورة تحت إزاحة هدب الشعيرة :

$$\int_K^L (Y_1 - Y_2)\, dx = \frac{n_L \tan \varepsilon}{n_a - n_L} \int_K^L Z dX \qquad (6.31)$$

وبفرض أن :

$$\int_K^L Z dX = F \text{ and } A = \frac{n_L \tan \varepsilon}{n_a - n_L} F$$

ينتج :

$$n_a - n_L = \frac{F}{2A}\frac{\lambda}{\Delta Z} \quad (6.32)$$

وفى حالة ضوء مستقطب فى اتجاه عمودى على محور الشعيرة :

$$n_a^{\parallel} = n_L + \frac{F^{\parallel}}{2A}\frac{\lambda}{\Delta Z} \quad (6.33)$$

وفى حالة ضوء مستقطب فى اتجاه مواز لمحور الشعيرة :

$$n_a^{\perp} = n_L + \frac{F^{\perp}}{2A}\frac{\lambda}{\Delta Z}$$

وبذلك يمكن حساب معاملات الانكسار $n_a^{\parallel}, n_a^{\perp}$ من قياس قيم A, F .

وبالنسبة لمعامل الانكسار المزدوج Δn_a فيعطى بالمعادلة :

$$\Delta n_a = \frac{F^{\parallel} - F^{\perp}}{A}\frac{\lambda}{2\Delta Z} \quad (6.34)$$

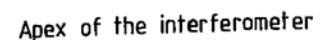
ويوضح الشكل رقم (٦/٩) سلوك الهدبة عند استخدام سوائل غمر لها معاملات انكسار مختلفة ويستخدم سائلا غمر مختلفان ولهما معاملى انكسار n_{L2}, n_{L1} (عند نفس درجة الحرارة) وذلك للاستغناء عن قياس مساحة مقطع الشعيرة (Hamza et al., ١٩٨٦) - ويمكن باستخدام المعادلتين الآتيتين تعيين معامل الانكسار المتوسط للشعيرة n_a :

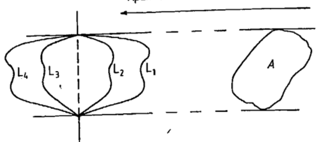
$$\frac{F_1}{2A}\frac{\lambda}{\Delta Z_1} = n_a - n_{L1} \quad (6.35)$$

and

$$\frac{F_2}{2A}\frac{\lambda}{\Delta Z_2} = n_a - n_{L2} \quad (6.36)$$

حيث F_2, F_1 هما المساحتان المحصورتان تحت إزاحتى الهدبتين والمسافة بين كل هدبتين متتاليتين فى حالتى المعادلتين (٦-٣٥) ، (٦-٣٦) هما ΔZ_2 , ΔZ_1 على الترتيب .





شكل رقم (٦/٩) : يمثل سلوك هدب فيزو للتداخل الضوئى عند استخدام أربعة سوائل غمر مختلفة لها معاملات انكسار $n_{L_1}, n_{L_2}, n_{L_3}, n_{L_4}$ وقيم هذه المعاملات بالمقارنة بقيمة معامل انكسار مادة الشعيرة n_a هى $n_{L_4} > n_{L_3} > n_a$, $n_a < n_{L_2} < n_{L_1}$
(من Hamza et al., 1985 a)

الألياف غير المتجانسة التركيب والمكونة من قشرة ولب

(Hamza et al., 1985b)

Homogeneous fibres with skin/core structure :

يبين الشكل رقم (٦/١٠) مقطعا عرضيا لشعيرة ذات لب غير منتظم المقطع العرضى محاط بقشرة غير منتظمة المقطع العرضى أيضا . وتعطى المعادلة الآتية مساحة المقطع العرضى A للشعيرة فى المستوى (X, Y) :

$$A = \int_M^S (Y_1 - Y_2) \, dX \qquad (6.37)$$

وتعطى مساحة المقطع العرضى للب الشعيرة فى المستوى (X, Y) من المعادلة :

$$B = \int_P^Q (Y_3 - Y_4) \, dX$$

DD

وتعطى المعادلة الآتية طول المسار الضوئى (OPL) للشعاع $\rightarrow$:

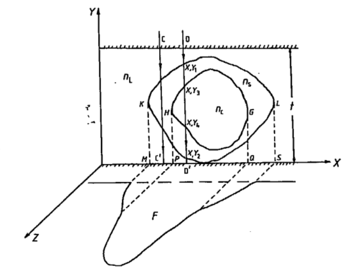
$$OPL = [t - (Y_1 - Y_2)] n_L + [(Y_1 - Y_2) - (Y_3 - Y_4)] n_s + (Y_3 - Y_4) n_c \qquad (6.38)$$

وبالنسبة للهدبة ذات رتبة التداخل N يمكن كتابة المعادلة :

$$N\lambda = 2n_L t + 2 (n_s - n_L) (Y_1 - Y_2) + 2 (Y_3 - Y_4) (n_c - n_s) \qquad (6.39)$$

وبتحويل نقطة الأصل إلى النقطة ($N\lambda / 2n_L \tan \varepsilon, o$) على المستوى (Z, X) ينتج :

$$n_L \tan \varepsilon\, Z = (n_s - n_L) (Y_1 - Y_2) + (n_c - n_s) (Y_3 - Y_4)$$



شكل رقم (٦/١٠) : يمثل شعيرة غير منتظمة المقطع العرضى لها لب محاط بقشرة ومغمورة فى إسفين مفضض يحصر سائلا . ويمثل F المساحة المحصورة تحت إزاحة الهدبة
(من Hamza et al., 1985 a)

وبإجراء التكامل للمعادلة السابقة يشمل المنطقة $S \geq X \geq M$ تنتج المساحة F المحصورة تحت إزاحة الهدبة :

$$n_L \tan \varepsilon \int_M^S Z\, dX = (n_s - n_L) \int_M^S (Y_1 - Y_2)\, dX$$

$$+ (n_c - n_s) \int_P^Q (Y_3 - Y_4)\, dX \qquad (6.40)$$

حيث :

$$\int_M^S Z\, dX = F$$

وتكون :

$$F n_L \tan \varepsilon = (n_s - n_L) A + (n_c - n_s) B$$

$$\frac{\lambda}{2\, \Delta Z} F = (n_s - n_L) A + (n_c - n_s) B$$

ويعطى معامل انكسار مادة الشعيرة باستخدام ضوء مستقطب فى اتجاه محور الشعيرة من المعادلة :

$$\frac{\lambda}{2\,\Delta Z} F^{\parallel} = (n_s^{\parallel} - n_L)\, A + (n_c^{\parallel} - n_s^{\parallel})\, B \qquad (6.41)$$

وفى حالة استخدام ضوء مستقطب فى اتجاه عمودى على محور الشعيرة تصبح المعادلة

$$\frac{\lambda}{2\,\Delta Z} F^{\perp} = (n_s^{\perp} - n_L)\, A + (n_c^{\perp} - n_s^{\perp})\, B$$

وينتج معامل الانكسار المزدوج Δn_c للب الشعيرة من المعادلة :

$$\Delta n_c = B^{-1} \left(\frac{\lambda}{2\,\Delta Z} (F^{\parallel} - F^{\perp}) - \Delta n_s (A - B) \right) \qquad (6.42)$$

ويمكن استنتاج معامل الانكسار المتوسط لمادة الشعيرة n_a بوضع :

$$n_s = n_c = n_a$$

حالة الألياف متعددة الطبقات (Hamza and Kabeel, 1986)

Multi-layer fibres :

يوضح الشكل رقم (١١/٦) مقطعا عرضيا فى شعيرة إسطوانية متعددة الطبقات موضوعة فى إسفين ضوئى وتحتوى الشعيرة على عدة طبقات عددها m ذات معاملات انكسار $n_1, n_2, n_3, \ldots n_m$

حيث n_1 هو معامل انكسار الطبقة الخارجية ، وكذلك فإن $n_m = n_c$

وتمثل أنصاف أقطار الطبقات المختلفة بالمعادلة :

$$r_Q = (X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}}, \quad Q = 1, 2, \ldots m$$

وتعطى المعادلة الآتية طول المسار الضوئى (OPL) للشعاع $\overrightarrow{E\acute{E}}$:

$$OPL = (t - 2Y_1)\, n_L + 2 (Y_1 - Y_2)\, n_1$$

$$+ 2 (Y_2 - Y_3)\, n_2 + \ldots .\, 2 (Y_{m-1} - Y_m)\, n_{m-1} + 2\, Y_m\, n_m \qquad (6.43)$$

ومن المعادلة الأساسية للتداخل نجد أن :

$$N\lambda - 2n_L Z \tan \varepsilon = 4 \sum_{Q=1}^{m} (n_Q - n_{Q-1}) Y_Q \qquad (6.44)$$

وبتحويل نقطة الأصل إلى $(N\lambda / 2n_L \tan \varepsilon, o)$ على المستوى (Z,X) ينتج أن :

$$n_L \tan \varepsilon\, Z = 2 \sum_{Q=1}^{Q=m} (n_Q - n_{Q-1}) Y_Q$$

وتمثل Z القيمة الجديدة لإزاحة الهدبة ، يكون اتجاهها نحو رأس الأسفين .

وتعطى المعادلة الآتية هدب فيزو للتداخل الضوئى على المستوى (Z,X) :

$$\frac{\lambda}{4\Delta Z} Z = \sum_{Q=1}^{m} (n_Q - n_{Q-1}) (r_Q^2 - X^2)^{1/2} \qquad (6.45)$$

حيث تعرف قيمة X بعدد الطبقات .

ولتلافى مشكلة وجود عدم الانتظام فى مقطع الشعيرة ، تمثل المساحة المحصورة تحت إزاحة الهدبة ، وعندما تعبر الشعيرة عمودية على محورها تمثل تكامل فرق المسار الضوئى عبر هذه الشعيرة (Simmens, ١٩٥٨) ويرتبط جزء المساحة F_m المحصور تحت إزاحة الهدبة فى المستوى (Z, X) فى حالة شعيرة متعددة الطبقات وفي المنطقة المحددة بـ $\alpha \leq X \leq \beta$ بالأجزاء $A_{Q,m}$ من مساحات مقاطع الطبقات المختلفة بالمعادلة :

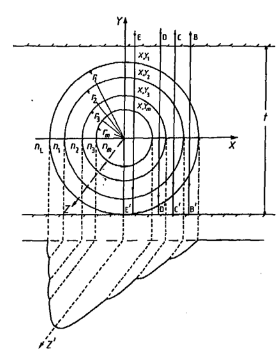
$$\frac{\lambda}{4\Delta Z} F_m = \sum_{Q=1}^{m} (n_Q - n_{Q-1}) A_{Q,m} \qquad (6.46)$$

حيث :

$$F_m = \int_{\alpha}^{\beta} Z\, dx$$

$$A_{Q,m} = \int_{\alpha}^{\beta} (r_Q^2 - X^2)^{1/2} dX$$

β, α هما نقطتان يتم اختيارهما على المحور X لخريطة هدب التداخل الضوئى interferogram .



شكل رقم (٦/١١) : مقطع عرضى لشعيرة إسطوانية متعددة الطبقات غمرت فى إسفين مفضض يحصر سائلا . وموضح شكل هدب التداخل الضوئى عبر كل طبقة من طبقات الشعيرة (من Hamza and Kabeel, 1986)

٦/٣- الألياف البصرية بنوعيها GRIN, STEP,

Optical fibres : Step-index and graded index :

٦/٣/١- تطبيق هدب التداخل الضوئى المتعدد على الألياف البصرية STEP لتعيين مواصفاتها وخصائصها

Multiple-beam interference fringes applied to step-index optical fibres to determine fibre characteristics:

تستخدم الألياف البصرية بنوعيها GRIN, STEP-index كموجهات للموجات الضوئية فى نظم التراسل الضوئى ، وهى ألياف إسطوانية الشكل نصف قطرها r_f تتكون من قشرة clad معامل انكسار مادتها n_{clad} ولب معامل انكسار مادته n_{core} ونصف قطره $r_c = a$ ، ودائما تكون $n_{core} > n_{clad}$.

وفى حالة الألياف البصرية STEP-index يكون معاملا انكسار طبقتيها n_{core}, n_{clad}

ثابتى القيمة . وهى إما أن تكون وحيدة المنوال monomode أو عديدة المنوال multimode ، والفرق بينهما يكون فى أبعاد لب وقشرة الشعيرة .

وفى حالة الألياف البصرية STEP-index وحيدة المنوال نجد أن $2r_c \approx 10\ \mu m$ أو أقل ، بينما $2\ r_f = 125\ \ \mu m$. وفى الشعيرة من الألياف GRIN عديدة المنوال تكون $2\ r_f = 125\ \mu m,\ 2\ r_c \approx 80\ \mu m$.

وفى جميع أنواع الألياف البصرية المستخدمة كموجهات للموجات تكون قيمة معامل انكسار مادة قشرتها n_{clad} ثابتة ، بينما تكون قيمة معامل انكسار لبها n_{core} ثابتة فقط فى حالة الألياف من نوع STEP-index ؛ وفى حالة الألياف من نوع GRIN نجد أن معامل انكسار لبها يقل مع البعد عن مركز الشعيرة ويتبع قانون أسى power law .

وبتطبيق هدب فيزو للتداخل الضوئى على شعيرة من نوع STEP-index المغمورة فى سائل موضوع بين مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر ، تكون المعادلة التى تعطى إزاحة الهدبة Z والمقاسة من المنقطة $(N\Delta Z, O)$ تجاه رأس الإسفين الضوئى هى المعادلة رقم (٦–٢٠) – كما تم استنتاجها سابقا :

$$Z = \frac{4\Delta Z}{\lambda}\,(\,n_{clad} - n_L)\,(\,r_f^2 - X^2\,)^{1/2} + \frac{4\Delta Z}{\lambda}\,(\,n_{core} - n_{clad})\,(\,r_c^2 - X^2\,)^{1/2}$$
$$= f_1\,(X) + f_2\,(X)$$

ويعطى شكل الدالة $Z = f_1\ (X)$ من المعادلة رقم (٦–٢١) التى تصف قطعا ناقصا نصف محورة الاكبر ونصف محوره الأصغر هما r_f, Ar_f حيث :

$$A = 4\,\Delta\,Z\,(\,n_{clad} - n_L)\,/\,\lambda$$

بينما القطع الناقص الذى تمثله الدالة $f_2\ (X)$ تكون أطوال نصف محوره الأكبر ونصف محوره الأصغر هى r_c, Br_c حيث :

$$B = 4\,\Delta\,Z\,(\,n_{core} - n_{clad})\,/\,\lambda$$

وذلك يتفق مع المعادلة رقم (٦–٢٢) .

وقد سبق أن شرحنا طريقة إضافة إسهامات الدالتين – كما ظهر ذلك فى الشكل رقم (٦/٧).

استنتاج بروفيل معامل انكسار شعيرة بصرية (STEP-index) من إزاحة هدب التداخل الضوئى :

Deduction of the index profile of a step - index optical fibre from the fringe shift :

نحصل من المعادلة (٦-٢١) على شكل هدب فيزو للتداخل الضوئى عندما تعبر شعيرة إسطوانية فى منطقة قشرتها $r_c \leq X \leq r_f$ ، وتكون معادلة المماس للقطع الناقص عند أى نقطة (Z', X') هى :

$$\frac{ZZ'}{A^2 r_f^2} + \frac{XX'}{r_f^2} = 1$$

ويكون ميل الخط المستقيم هو :

$$\frac{dX}{dZ} = -\frac{Z'}{X'}\frac{1}{A^2}$$

وينتج عن ذلك :

$$\frac{dX}{dZ}\frac{X'}{Z'} = -[\lambda^2 / 16(\Delta Z)^2 (n_{clad} - n_L)^2]$$

= constant for the fringe system.

وهذا هو البارامتر الذى يوضح ثبوت قيمة معامل الانكسار الذى يميز شعيرة الـ-STEP index .

وباعتبار أن :

$$n_{clad} - n_L = \lambda / 4\Delta Z \left|\frac{dX}{dZ}\frac{X'}{Z'}\right|^{1/2} \qquad r_c \leq X \leq r_f$$

ولمنطقة لب الشعيرة وباستخدام سائل له معامل انكسار n_L يساوى معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة n_{clad} يكون :

$$n_{core} - n_L = \lambda / 4\Delta Z \left|\frac{dX}{dZ}\frac{X'}{Z'}\right|^{1/2} \qquad 0 \leq X \leq r_c$$

ويوضح الشكل رقم (٦/١٢) بروفيل معامل الانكسار $(n_{clad}-n_L)$ فى المنطقة $r_c \leq X \leq r_f$ وبروفيل معامل الانكسار $(n_{core}-n_L)$ فى المنطقة $0 \leq X \leq r_c$ وذلك فى حالة $n_L = n_{clad}$

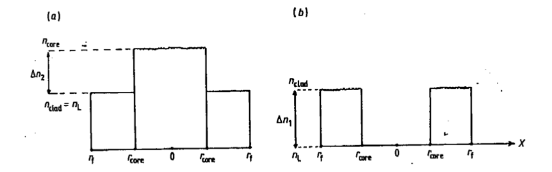
وفى الحالة العامة التى يغمر فيها شعيرة من نوع step-index فى سائل يحصره إسفين مفضض سطحية وكانت $n_L \neq n_{cald}$ أى حالة لامضاهاة ، فإنه يمكن استنتاج بروفيل معامل الانكسار فى منطقة لب الشعيرة من شكل الهدب التى نحصل عليها عمليا وذلك بطرح الإسهام الرياضى لطبقة القشرة فى منطقة اللب من قيم الإزاحة Z عند جميع النقط على الهدبة لجميع قيم X فى حالة $n_c \geq n_{clad} \geq n_L$. وفى الحالة الثانية التى تكون فيها $n_L > n_{clad}$ ، فإن قيم إضافة $|Z_1|$ الى Z من منحنى الهدبة الذى نحصل عليه عمليا يعطى Z_2 لجميع قيم X ... ونحصل على الإسهام الرياضى لمنطقة القشرة بإكمال القطع الناقص الذى يبدأ جزآه فى منطقة القشرة ليغطى منطقة اللب .

وبتعيين $|(dX/dZ)\ (X'/Z')|^{1/2}$ فى منطقة اللب حيث : $r = r_c, -a \leq X \leq a$

فإننا نحصل على قيم $(n_{core} - n_{clad})$ لجميع قيم x ومن ثم بروفيل معامل الانكسار .

وفى منطقة القشرة حيث : $r_c \leq X \leq r_f$ فإن قيم Z مقاسة من $Z = o$ تعطى :

$(n_{clad} - n_L)$ من العلاقة $\left|\frac{dX}{dZ}\frac{X'}{Z'}\right|^{1/2}\frac{\lambda}{4\Delta Z}$



شكل رقم (١٢/٦) : بروفيل معامل الانكسار

أ- حالة سائل الغمر له معامل انكسار مساو لمعامل انكسار القشرة

ب- ثبات قيمة معامل انكسار القشرة n_{clad} على مدى سمكها

٢/٣/٦- نظرية هدب التداخل الضوئى المتعدد عند تطبيقها على الألياف البصرية متدرجة معامل انكسار لبها GRIN

The theory of multiple-bam Fizeau fringes applied to graded-index optical fibres:

طبق "Marhic et al" (١٩٧٥) طريقة التداخل الضوئى الثنائى على الألياف البصرية بغمر الشعيرة فى سائل معامل انكساره يساوى معامل انكسار مادة قشرة الشعيرة وإضاءتها بأشعة عمودية على محورها . وتم فى هذه الدراسة الحصول على تعبير تحليلى مبسط لفرق المسار الضوئى للألياف ذات بروفيل معامل انكسار لبها يزداد من بداية لب شعيرة حتى منتصفها مع مربع البعد عن المركز .

وطبق "Saunders & Gardner" (١٩٧٧) طريقة Marhic على الألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار . وفى هذه الحالة تحسب قيمة Δn من القيمة العظمى لإزاحة الهدبة وحسب قيمة α من أى نقطة على الهدبة باستخدام الحاسب العلمى .

وفيما يلى نوضح المعادلات الرياضية لمجموعة هدب فيزو التى تعبر شعيرة من الألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار – Barakat et al, ١٩٨٥ – وافترض فى هذه المعالجة أن الشعيرة ذات مقطع عرضى مستدير تماما وله لب محاط بقشرة وغمرت الشعيرة فى سائل موضوع بين مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر ، بحيث يكون محورها عموديا على حافة الإسفين الضوئى .

واعتبر أن سطح الشعيرة يمس السطح المفضض للمسطح الضوئى السفلى ، والشكل رقم (١٣/٦) يمثل مقطعا عرضيا لشعيرة إسطوانية متدرجة معامل الانكسار GRIN ونصف قطرها r_f وتتكون من لب معامل انكسار مادته متدرج ويساوى $n(r)$ ونصف قطره r_c وقشرة معامل انكسار مادتها ثابت ومقداره n_{clad}

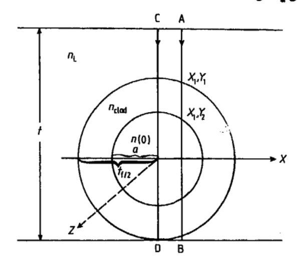
$$n(r) = n(0)\,[\,1 - 2\Delta\,(r/a)^{\alpha}\,]^{1/2} \qquad o \le r \le \alpha \qquad (6.47)$$

حيث r هى المسافة مقاسة من مركز الشعيرة ، a هو نصف قطر لب الشعيرة Gloge and Marcatili (١٩٧٣) :

$$\Delta = (n^2(o) - n^2(a)) / (2 n^2(o))$$

و α هو البارامتر الذى يحدد شكل البروفيل ، وتغمر الشعيرة متدرجة معامل الانكسار فى السائل المحصور بين المسطحين الضوئيين المفضضين المكونين للإسفين الضوئى ودرجة استوائهما هى $\pm \lambda/50$ ، وكانت قيمة معامل انكسار السائل n_L مقاربة لقيمة معامل انكسار قشرة الشعيرة n_{clad} . وسقطت حزمة متوازية $\overset{AB}{\rightarrow}$; $\overset{CD}{\rightarrow}$ من الأشعة ذات الطول الموجى λ عمودية على المسطح الضوئى الأسفل ، واختيرت زاوية الإسفين الضوئى ε بحيث تكون صغيرة وتفى بشروط تكوين هدب التداخل الضوئى المتعدد .

وكان محور الشعيرة فى اتجاه المحور Z وحافة الإسفين الضوئى توازى المحور X وكان سمك الفجوة الضوئية هو t .



شكل رقم (١٣/٦) : مقطع عرضى لمقياس التداخل الذى يحصر سائل الغمر وقد غمس فيه شعيرة متدرجة معامل انكسار لبها n(r)

والمعادلة الآتية تعطى فرق المسار الضوئى (OPL) للشعاع $\overset{AB}{\rightarrow}$:

$$OPL = (t - 2y_2)\, n_L + 2\,(y_2 - y_1)\, n_{clad} + 2 \int_0^{y_1 (a^2 - X_1^2)^{\frac{1}{2}}} n(r)\, dy \qquad (6.48)$$

وتعرف n (r) من المعادلة رقم (٦-٤٧) . وفى حالة $\Delta << 1$ كما هو الحال فى الألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار تكون :

$$n(r) = n(o) - \Delta n (r/a)^{\alpha}$$

حيث :

$$\Delta n = (n(o) - n(a))$$

وينتج أن :

$$OPL = (t - 2y_2) n_L + 2(y_2 - y_1) n_{clad} + 2n(0)(a^2 - X_1^2)^{1/2}$$

$$- 2\frac{\Delta n}{a^{\alpha}} \int_0^{(a^2 - x_1^2)^{1/2}} (X_1^2 + y^2)^{\alpha/2} dy \qquad (6.49)$$

وبالنسبة للهدبة ذات رتبة التداخل N :

$$N\lambda = 2(OPL) = 2n_L t + 4y_2(n_{clad} - n_L) + 4\Delta n y_1$$

$$- \frac{4\Delta n}{a^{\alpha}} \int_0^{(a^2 - x_1^2)^{1/2}} (X_1^2 + y^2)^{\alpha/2} dy \qquad (6.50)$$

Now $t = z \tan \varepsilon$ ($z = o$ at $t = o$) so

$$N\lambda - 2n_L Z \tan \varepsilon = 4y_2(n_{cald} - n_L)\, 4\Delta n y_1$$

$$- \frac{4\Delta n}{a^{\alpha}} \int_0^{(a^2 - x_1^2)^{1/2}} (X_1^2 + y^2)^{\alpha/2} dy \qquad (6.51)$$

وبالتحويل إلى النقطة ,$(O, N\lambda/2n_L \tan \varepsilon)$ ينتج :

$$Z2n_L \tan \varepsilon = 4y_2(n_{clad} - n_L) + 4\Delta n y_1 - 4\frac{\Delta n}{a^{\alpha}} \int_0^{(a^2 - x_1^2)^{1/2}} (x_1^2 + y^2)^{\alpha/2} dy$$

$$(6.52)$$

و ΔZ هى المسافة بين كل هدبتين متتاليتين فى منطقة السائل وتساوى $\lambda/2n_L \tan \varepsilon$، فإذا كانت δZ هى مقدار إزاحة الهدبة ذات الرتبة N فى الشعيرة عن موقعها فى منطقة السائل ، فإن :

$$\left(\frac{\delta Z}{\Delta Z}\right)_{x1}\frac{\lambda}{2} = 2\left(y_2 (n_{clad} - n_L) + \Delta n y_1 - \frac{\Delta n}{a^\alpha}\int_0^{(a^2-x_1^2)^{1/2}} (x_1^2 + y^2)^{\alpha/2} dy\right)$$

$$= 2\left((n_{clad} - n_L) \sqrt{r_f^2 - x_1^2} + \Delta n \sqrt{a^2 - x_1^2} - \frac{\Delta n}{a^\alpha}\int_0^{(a^2-x_1^2)^{1/2}} (x_1^2 + y^2)^{\alpha/2} dy\right) \quad (6.53)$$

وتعطى هذه المعادلة قيم $\delta Z/ \Delta Z$ لأى قيم من قيم X_1 حيث $o \le x_1 \le a$ ، وذلك بدلالة $\alpha, \Delta n$ ، وبالتعويض عن x_1 بالقيمة صفر تنتج المعادلة :

$$\left(\frac{\delta Z}{\Delta Z}\right)\frac{\lambda}{2} = (n_{clad} - n_L) t_f + t_{core} \Delta n \frac{\alpha}{(\alpha + 1)} \quad (6.54)$$

حيث :

$$t_{core} = 2a$$

وكذلك :

$$t_f = 2 y_2$$

وقد توصل "Saunders and Gardner" (١٩٧٧) إلى معادلة مشابهة للمعادلة رقم (٦-٥٤) ، وذلك باستخدام مقياس التداخل الضوئى الثنائى فى حالة $n_{clad} = n_L$ أى حالة المضاهاة .

أما فى حالة الألياف STEP - index حيث $\alpha = \infty$ فلقد توصل " بركات Barakat " (١٩٧١) إلي المعادلة :

$$\left(\frac{\delta Z}{\Delta Z}\right)\frac{\lambda}{2} = (n_{clad} - n_L) t_f + t_{core} (n_{core} - n_{clad}) \quad (6.55)$$

وبالتعويض عن x_1 فى المعادلة رقم (٦-٥٣) بقيمتين يمكن استنتاج البارامتر α بمعلومية قيم .

$$n_L, n_{clad}, (\delta Z / \Delta Z)_{x2}, (\delta Z / \Delta Z)_{x1}, x_2, x_1$$

وبالتعويض فى المعادلة رقم (٦-٥٣) بأى قيمة لـ X ، حيث $o \leq x \leq a$ يمكن تعيين Δn .

واتبعت طريقة عامة لحساب كل من α , Δn باستخدام أكثر من قيمتين للمقدار $\delta Z/\Delta Z$ وهى طريقة أقل تباينا minimum variance technique.

حيث :

$$I_{\alpha}(x) = \int_{0}^{(a^2 - X_1^2)^{1/2}} (x^2 + y^2)^{\alpha/2} dy$$

تحسب عدديا .

ولاتكون قيم $\alpha, \Delta n$ معروفة مقدما فى المعادلة (٦-٥٣) ، والهدف هو مطابقة القيم المقاسة عمليا لبروفيل الهدبة مع المعادلة السابقة لتعيين كل من $\alpha, \Delta n$ ، ويلزم لهذا الغرض تطبيع البروفيل النظرى لبعض النقاط المقاسة عمليا ، ولندخل فى الاعتبار استجابة أجهزة القياس (التكبير والعوامل الأخرى) . والنقطة المختارة هى التى تكون عندها $F(x) = \delta Z$ لاتعتمد على قيم $\alpha, \Delta n$.

ونفترض أن المعادلة الآتية تعبر عن دالة البروفيل عند $x = a$:

$$F(a) = \frac{4\Delta Z}{\lambda} [(n_{clad} - n_L)(r_f^2 - a^2)^{1/2}]$$

وأن دالة البروفيل بعد تطبيقها تعطيها العلاقة :

$$F^*(x) = \frac{F(x)}{F(a)} \delta Z_{expt} \Big|_{x=a}$$

وبإعطاء α قيما مختلفة وحساب قيم Δn لكل قيمة للبارامتر α يمكن الحصول على قيم $\Delta n, \alpha$ التى تعطى أقرب تطابق مع البروفيل الذى تم الحصول عليه عمليا .

٦/٤- تطبيق نظرية هدب تساوى الرتبة اللونية FECO على الألياف

The theory of fringes of equal chromatic order (FECO)

من المعروف أن هدب التداخل المتعدد لفيزو ، التى نحصل عليها عند سقوط حزمة من الأشعة وحيدة الطول الموجى على إسفين مفضض ، تتكون على سطح مستوى يقع بالقرب من الإسفين وهو مستوى ذو الرتبة الصفرية الذى لايعتمد موقعه على طول موجة الضوء

المستخدم . فإذا تم إسقاط مستوى على فتحة مطياف وحل مصدر ضوء أبيض محل مصدر الضوء أحادى الطول الموجى ، فإن عائلة من هدب التداخل ذات الرتبة اللونية المتساوية التى اكتشفها العالم « تولانسكى Tolansky عام ١٩٦٠ » ترى على المستوى الطيفى .

ويعتمد شكل الهدب الناتجة أساسا على الطريقة التى تتغير بها قيم $n_\lambda t$ على امتداد مقطع الإسفين الذى حددته فتحة المطياف ، حيث t هى البعد بين سطحى الإسفين أي بعد مقياس التداخل ، n_λ معامل انكسار الوسط المحصور بين سطحى مقياس التداخل . فإذا اخترنا اتجاه الفتحة ليمثل محور السينات x فإنه فى هذه الحالة تمثل دالة تغير $n_\lambda t$ بالمتغير f (x) أى $n_\lambda t = f(x)$. ويكون المستوى الطيفى هو (λ , x) . وعلى ذلك فإننا نحصل على شكل هدب التداخل بإجراء تحويل العلاقة $n_\lambda t = f(x)$ من المستوى (t, x) إلى المستوى (λ, x) باستخدام علاقة التحويل $N_\lambda = 2n_\lambda t$ ، وذلك فى حالة الهدب المضيئة على خلفية مظلمة التى نحصل عليها عند النفاذ ، وكذلك فى حالة الهدب المعتمة على خلفية مضيئة تلك التى نحصل عليها عند الانعكاس ، إذا ما أهملتها تغير الطور عند الانعكاس . وفى حالة إسفين مفضض يحصر سائلا وكانت حافته موازية لفتحة المطياف فإن $n_{L,\lambda} t = k$ ، حيث K مقدار ثابت عند طول موجى λ محدد ، $n_{L,\lambda}$ معامل انكسار السائل المحصور .

وتمثل عائلة هدب التداخل متساوية الرتبة اللونية على المستوى(λ,x) بالمعادلة :

$$\lambda_N = \frac{2k}{N} .$$

حيث تأخذ N رتبة الهدبة القيم ١، ٢، ٣، . لهذا فإن هدب التداخل النتجة فى هذه الحالة هى خطوط مستقيمة وموازية لمحور x حيث الفرق فى العدد الموجى $\Delta\upsilon$ بين أى هدبتين متعاقبتين $\frac{1}{2} n_{L,\lambda} t = (\upsilon_{N+1} - \upsilon_N)$ ، حيث $n_{L,\lambda}$ هو متوسط قيمتى معامل الانكسار للسائل على المدى $\lambda_{(N+1)} - \lambda_N$.

دعنا نتناول المنطقة من مقياس التداخل التى تحتوى علي الشعيرة . وتعطى المعادلة (٦–٧) طول المسار الضوئى OPL لحزمة الأشعة المركزية عند تكون هدبة مضيئة تأخذ t

قيمة ثابتة على المستوي (λ, x) لأن حافة الاسفين قد ضبطت موازية لفتحة المطياف . وبتربيع المعادلة (٦-٧) ونقل نقطة الأصل إلى النقطة $(2n_{L,\lambda} t / N, o)$ نحصل على المعادلة (٦-٥٦) :

$$\lambda^2 = (16/N^2)\,[(n_{s,\lambda} - n_{L,\lambda})^2 (r_f^2 - x^2) + (n_{c,\lambda} - n_{s,\lambda})^2 (r_c^2 - x^2) + 2\,(n_{s,\lambda} - n_{L,\lambda})(n_{c,\lambda} - n_{s,\lambda})(r_f^2 - x^2)^{1/2}(r_c^2 - x^2)^{1/2}] \qquad (6.56)$$

هذه هى المعادلة المطلوبة التى تعطى مجموعة هدب التداخل الضوئى متساوية الرتبة اللونية FECO التى تعبر الشعيرة فى المنطقة $-r_c \le -x \le o,\ o \le x \le r_f$ حيث $n_{L,\lambda}, n_{c,\lambda}$ ، $n_{s,\lambda}$ هى معاملات الانكسار للقشرة ولب الشعيرة والسائل المحصور بالترتيب عند الطول الموجى المناظر لكل نقطة على الهدبة التى رتبتها N .

عند $x = o$

$$\begin{aligned}\lambda &= (4/N)\ (n_{s,\lambda} - n_{L,\lambda})\, r_f + (n_{c,\lambda} - n_{s,\lambda})\, r_c \\ &= (2/N)\ (n_{s,\lambda} t_s + n_{c,\lambda} t_c - n_{L,\lambda} t_f) \\ &= (2/N)\ (n_{a,\lambda} - n_{L,\lambda})\, t_f\end{aligned}$$

حيث $n_{a,\lambda}$ هى معامل الانكسار المتوسط الذى تعرفه المعادلة (٦-١١) للطول الموجى المناظر للنقطة على الهدب ذات الرتبة N عند $x = o$. فمثلا الطول الموجى λ عند النقطة b على الهدبة التى رتبتها $(N + 1)$ - انظر شكل (٦-١٤) - توضح رسما تخطيطيا للمعادلة (٦-٥٦).

والنطقة $(2n_{L,\lambda} t/N, o)$ هى نقطة تقاطع امتداد الجزء المستقيم من الهدبة التى رتبتها N فى منطقة السائل مع محور الشعيرة ، كما هو موضح بالنقطة o فى الشكل رقم (٦/١٤) للهدبة التى رتبتها $(N + 1)$.

وفى حالة شعيرة تحوى وسطا واحدا تكون $n_{s,\lambda} = n_{c,\lambda} = n_\lambda$ ، ونحصل على شكل الهدب بالتعويض فى المعادلة (٦-٥٦) ، فهى تماثل شكل الهدب عبر شعيرة فى المنطقة $r_c \le x \le r_f$. ويمثل شكل الهدب بالمعادلة :

$$\lambda^2 / (4/N)\,[(n_\lambda - n_{L,\lambda})\, r_f]^2 + x^2 / r_f^2 = 1$$

وتمثل هذه المعادلة مجموعة من القطع الناقصة ذات المحور الأكبر والمحور الأصغر r_f , r_f/N $(n_\lambda - n_{L,\lambda})$ 4 على الترتيب للقيم الصحيحة المتتابعة للرتبة N .

وفى حالة شعيرة تحوى وسطا واحدا أى متجانسة التركيب ومعامل انكسار مادتها m_λ ، يتغير طول المحور الرئيسى لأى قطع ناقص مع $(n_\lambda - n_{L,\lambda}) / N$. n_λ ، $n_{L,\lambda}$ هما معامل انكسار الشعيرة والسائل المحصور على الترتيب لطول الموجة التى يحددها رأس القطع الناقص ، أى هدبة التداخل ذات الرتبة N عند x = o . وفى الشكل (١٤/٦) هذا الطول الموجى يحدده النقطة a على المنحنى المتقطع لرتبة التداخل (N + 1) . ويوضح الشكل (١٤/٦) الحالات الثلاث التى سوف نتناولها وهى المبينة بالمنحنيات المتقطعة .

أ- عندما تكون $n_\lambda > n_{L,\lambda}$ هذه هى حالة الهدب ذات الرتب N, (N + 1), (N + 2) .

ب- عندما تكون $n_{\lambda 1} = n_{L,\lambda 1}$ أى حالة المضاهاة عند هذا الطول الموجى . وفى هذه الحالة لاتحدث إزاحة للهدبة أثناء عبورها من منطقة السائل إلى منطقة الشعيرة التى تحددها $r_c \leq x \leq r_f$. يحدث هذا عند الهدبة ذات الرتبة (N + 3) ، كما هو موضح فى شكل (١٤/٦) ومنه يمكن تعيين λ_1 .

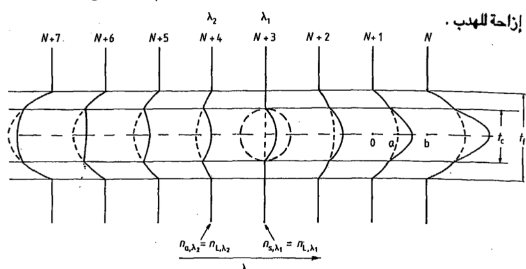
جـ- عندما تكون $n_\lambda < n_{L,\lambda}$ ، نحصل على هدب تداخل محدبة فى اتجاه الطول الموجى الأقصر . هذه هى حالة الهدب ذات الرتب (N + 4), (N + 5), (N + 6) .

وفى حالة شعيرة متكونة من قشرة ولب وفى المنطقة $o \leq x \leq r_c$ وكذلك لصورتها فى مرآة مستوية وضعت على محور الشعيرة يمثل الهدب الناتجة المنحنيات المتصلة الموضحة فى الشكل (١٤/٦). وعندما تكون $n_{L,\lambda 1} = n_{s,\lambda 1}$ فإن إزاحة الهدب عند x = o بين الهدبة فى منطقة السائل والهدبة عبر الشعيرة تساوى $4r_c/N$ $(n_{c,\lambda 1} - n_{s,\lambda 1})$ وفى حالة $n_{c,\lambda} > n_{s,\lambda}$ يمثل شكل هدب التداخل متساوية الرتبة اللونية فى هذه المنطقة بالمنحنيات المتصلة المناظرة للهدبة التى رتبتها (N + 3) ، كما هو موضح فى الشكل (١٤/٦) . أما فى حالة تساوى $n_{a,\lambda}$ مع $n_{L,\lambda}$ حيث :

$$n_{a,\lambda} = (n_{c,\lambda}\, t_c + n_{s,\lambda}\, t_s) / t_f$$

فإنه لايحدث إزاحة للهدبة عند x= o عند انتقالها من منطقة السائل إلى الشعيرة . هذا ماتوضحه الهدبة التى رتبتها (N + 4) فى الشكل (١٤/٦) وممثلة بالمنحنى المتصل .

ولقد استخدم "Faust" (١٩٥٤) هدب التداخل متساوية الرتبة اللونية فى تعيين معامل الانكسار المتوسطة للألياف . ولقد اعتمدت طريقته على استخدام النقط التى لايحدث عندها إزاحة للهدب .



شكل رقم (١٤/٦) : رسم تخطيطى لهدب التداخل الضوئى متساوية الرتبة اللونية FECO عبر شعيرة مغمورة فى سائل يحصره مقياس التداخل . تعبر الخطوط المتقطعة عن الهدب فى حالة شعيرة متجانسة التركيب فى حين تعبر الخطوط المتصلة عن حالة شعيرة سمكها t_f ذات لب سمكه t_c محاط بقشرة . والهدبة ذات الرتبة N + 3 تكون $n_{L,\lambda 1} = n_{s,\lambda 1}$ كما هو موضح فى الشكل ، فى حين أنه للهدبة ذات الرتبة N + 4 تكون $n_{L,\lambda 2} = n_{a,\lambda 2}$ (من Barakat, 1971)

٦/٥- تطبيق طرق التداخل الضوئى المتعدد لتعيين بعض الخصائص الفيزيقية للألياف

Applications of multiple-beam interferometric methods to the determination of some physical properties of fibres :

تقدم معاملات انكسار الألياف التركيبية والطبيعية – للضوء المستقطب فى اتجاه محور الشعيرة وفي الاتجاه العمودى عليه – طريقة مناسبة لقياس مدى ترتيب الجزيئات بالنسبة لمحور الشعيرة . كما تعطى قياسات معاملات الانكسار المزودج لقشرة ولب الشعيرة مقياسا لدرجة تشتت الجزيئات بالنسبة إلى اتجاه معين . وتساعد هذه المعلومات فى التعرف على تركيب الألياف متباينة الخواص الضوئية . وتعتبر طرق التداخل الضوئى المتعدد أداة هامة

فى علم الألياف Fibre science ، فهى تقدم قياسات دقيقة لمعاملات انكسار لب وقشرة الألياف الطبيعية والتركيبية وكذلك الانكسار المزدوج birefringence لكل طبقة من طبقات الشعيرة . وتمكن طرق التداخل الضوئى المتعدد من تعيين قيم تغير معاملات انكسار الألياف مع :

أ- طول موجة الضوء المستخدم (dn/dλ) أى مقدار تفريقها للضوء .

ب- درجة الحرارة (dn/dT) أى الخصائص الضوئية - الحرارية opto-thermal .

جـ- درجة الشد والاستطالة لوحدة الأطوال ، أى الخصائص الضوئية - الميكانيكية opto-mechanical .

وكذلك فإن هدب التداخل الضوئى المتعدد تعطى معلومات كمية عن الخصائص الضوئية لكل من قشرة ولب الشعيرة ومقدار تغير كل منهما على امتداد محور الشعيرة ، وذلك فى الألياف غير متجانسة التركيب Heterogeneous fibres ، ويمكن استخدام هذه الهدب فى حالة الألياف الطبيعية والتركيبية ذات المقاطع العرضية المنتظمة وغير المنتظمة والألياف المبرومة Twisted fibres .

وتسمح طرق التداخل الضوئي المتعدد بتعيين بروفيل معامل انكسار قشرة ولب الشعيرات ، وذلك فى الألياف البصرية ذات بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة STEP ، وكذلك متدرجة معامل الانكسار GRIN ، وهى تعطى معلومات عن تركيب هذه الألياف وكذلك عن الألياف متعددة الطبقات المتراكبة multi-layer structure للب الشعيرة ، والبارامتر α الذى يحكم تغير معامل انكسار لب الشعيرة مع المسافة من مركز الشعيرة . وتساعد هذه المعلومات فى ضبط عملية تصنيع الألياف البصرية بالطريقة الكيميائية المعدلة لتحضير الألياف بترسيب الأبخرة MCVD .

وتتميز هدب التداخل الضوئى المتعدد بكونها حادة جدا ، وبذلك فإنها تعطى قياسات دقيقة لإزاحات هذه الهدب داخل الشعيرات ، وتتناسب قيمة إزاحة الهدبة مع ضعف فرق الطور الذى نشأ عن وجود الشعيرة . ولذلك فإن طريقة هدب التداخل الضوئي المتعدد أدق من طريقة التداخل الثنائى - Tolansky, 1948 .

ولاستكمال الصورة بالنسبة لترتيب الجزيئات داخل الشعيرة فإن هذه الدراسات الضوئية تؤخذ فى الاعتبار بجانب طرق الفحص الأخرى مثل استخدام حيود الأشعة السينية والميكروسكوب الألكترونى والتحليل الطيفى بالامتصاص الجزيئى .

وسندرس فى الفصل السابع طريقة فحص تضاريس سطح الألياف باستخدام طرق التداخل الضوئى .

٦/٥/١- النظام البصرى المستخدم وطريقة تكوين هدب التداخل الضوئى المتعدد

Experimental arrangement and procedure for forming multiple-beam interference fringes :

استخدم « تولانسكى » الإسفين الضوئى فى الحصول على هدب التداخل المتعدد (Tolansky, 1948,60) . وطبقت هذه الهدب لتعيين معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف ، وذلك عن طريق قياس فرق المسار الضوئى عند غمر شعيرة فى سائل محصور بين مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر بزاوية صغيرة .

وقدم « فاوست Faust » (١٩٥٢، ١٩٥٤) طريقة لتطبيق ميكروسكوب التداخل الضوئى لتعيين تغير معاملات الانكسار فى عينات غير متجانسة ضوئيا optically heterogeneous specimens وعين معامل الانكسار المتوسط للشعيرة باستخدام هدب تساوى الرتبة اللونية White light fringes of equal chromatic order .

وشرح « بركات والحناوى Barakat and El-Hennawi » (١٩٧١) النظام البصرى المستخدم للحصول على هدب التداخل الضوئى المتعدد ، وفيه تسقط حزمة متوازية من الأشعة – أحادية طول الموجة والمستقطبة استوائيا – على الإسفين الضوئى الموضوع على قاعدة الميكروسكوب بحيث يكون السقوط عموديا – ويبين الشكل رقم (٦/١٥) النظام البصرى المستخدم للحصول على هدب تداخل ضوئى عند النفاذ وعند الانعكاس . ويتكون الإسفين الضوئى من مسطحين ضوئيين مستديرين ، قطر كل منهما ٣٥ ملليمتر وسمك كل منهما ٧ ملليمتر ، وكانت درجة الاستواء تساوى ± ٠,٠١ ميكرومتر .

والحصول على هدب تداخل ضوئى عند النفاذ يغطى الوجه الداخلى لكل مسطح ضوئى بطبقة من الفضة ذات انعكاسية كبيرة ودرجة نفاذية قليلة نسبيا ، ويمكن الحصول على ذلك بالتبخير الحرارى للفضة عند ضغط اقل من ١٠^-٥ تور (مليمتر زئبق) بحيث تكون انعكاسيتها للضوء أعلى من ٧٥٪ ونفاذيتها حوالى ٢٢٪ .

أما فى حالة هدب التداخل الضوئى عند الانعكاس فإن انعكاسية المسطح الضوئى الاسفل تكون أكثر من ٩٠٪ والمسطح العلوى تكون حوالى ٧٠٪ . ويوضع المسطحان الضوئيان فى حامل "Jig" وتوضع على المسطح الضوئى الأسفل نقطة من سائل معامل انكساره يقارب معامل انكسار مادة الشعيرة (مقاسا بطريقة الحد الفاصل لبيك مثلا) ، وتغمر الشعيرة فى السائل وتثبت نهايتاها على حافتى المسطح الضوئى ، ويوضع المسطح الضوئى العلوى فى مكانه من الحامل لكى يتكون الإسفين الضوئى .

وفى الفحص بطريقة التداخل الضوئى وفى غير حالة تناول التفرق الضوئى فإنه يفضل عمل غطاء متعدد الطبقات multilayer coating من مادة عازلة معامل انكسارها صغير(L) ومادة عازلة أخرى معامل انكسارها كبير (H) ، وتستخدم الطبقات بالترتيب LHLH ... L بدلا من الفضة لتزيد الانعكاسية دون زيادة فى الامتصاص . وتؤدى هذه الطريقة إلى الحصول على هدب حادة ضئيلة العرض . ويوضع الإسفين الضوئى على قاعدة الميكروسكوب وتضبط الفجوة الضوئية والزاوية بين المسطحين الضوئيين المكونين لهذا الإسفين – يتم ذلك باستخدام ثلاثة مسامير محورية screws حفرت مواقعها على محيط حامل المسطحين الضوئيين – ويتم الحصول على هدب حادة تعبر الشعيرة عمودية على محورها . وينبغى التخلص من التخلف فى الطور بين الأشعة المنعكسة المتعاقبة الذى يمثل تباعدا عن قيمة ثابتة ويزداد مع زيادة رتبة الشعاع المنعكس .

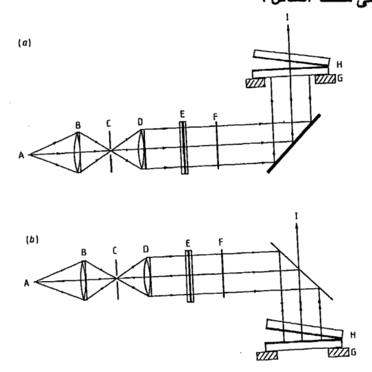
والتخلف الطورى δ تعطيه المعادلة :

$$\delta = (2\pi/\lambda)\,\frac{4}{3}\,n_L\,t\,\varepsilon^2$$

وعندما يتم تقليص التخلف الطورى يسمح ذلك لعدد كبير من الأشعة المنعكسة بالمشاركة فى تكوين الهدب وبذلك تتكون هدب حادة ضئيلة العرض بالنسبة للمسافة بين هدبتين

متتاليتين وفى حالة الألياف الطبيعية والتركيبية يكون سمك الشعيرة أقل من ١٠٠ ميكرومتر ، ولهذا يسهل الحصول على فجوة ضوئية صغيرة نسبيا ، كما أن زاوية الإسفين ε ينبغى أن تكون صغيرة أيضا وذلك باستخدام مسطحين ضوئيين قطر كل منهما ٣٥ ملليمتر .

ولكن فى حالة دراسة الألياف البصرية بنوعيها GRIN, STEP يكون سمك الشعيرة ١٢٥ ميكرومتر ولهذا يفضل استخدام إسفين ضوئى مكون من مسطحين قطر كل منهما ١٠٠ ملليمتر . ويعطى النظام البصرى مقطعا عرضيا كبيرا للشعاع الضوئى أحادى طول الموجة الذى يستخدم كمصدر ضوئى للإسفين . وتأخذ زاوية الإسفين الضوئى القيمة من ٥ × ١٠^-٣ الى ١٠^-٤ زاوية نصف قطرية وهى تحدد المسافة بين كل هدبتين متتاليتين fringe spacing فى منطقة السائل .



شكل رقم (١٥/٦) : النظام البصرى المستخدم للحصول على هدب فيزو للتداخل الضوئى المتعدد عند النفاذ (a) وعند الانعكاس (b) A مصباح زئبق ، B عدسة مجمعة ، C فتحة دائرية ، D عدسة مجمعة ، E مستقطب ، F مرشح ضوئى ، G قاعدة الميكروسكوب ، H مقياس التداخل الضوئى ، I اتجاه الضوء إلى الكاميرا المركبة على الميكروسكوب .

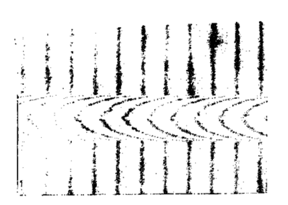
وتكون هدب التداخل الضوئى المتعدد فى منطقة السائل على هيئة خطوط مستقيمة موازية لحافة الإسفين الضوئى ، والمسافة بين كل هدبتين متتاليتين ΔZ تعطيها المعادلة :

$$\Delta Z = \lambda/2\, n_L \tan \varepsilon$$

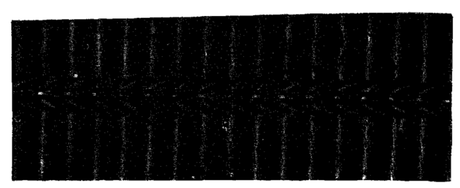
وعندما تعبر السطح الفاصل بين السائل وقشرة الشعيرة دائرية المقطع العرضى فإن هذه الهدبة تتبع مسارا على هيئة قطع ناقص تم استنتاجه رياضيا فى هذا الفصل . وتوضح الأشكال (٦/١٦) ، (٦/١٧) ، (٦/١٨) أمثله لخرائط هدب التداخل الضوئى لبعض الألياف .



شكل رقم (٦/١٦) : هدب التداخل الضوئى المتعدد عند الانعكاس عبر شعيرة طبيعية (وبر الجمل) ، سمكها ٤٠ ميكرون (من Barakat et al., 1975)



شكل رقم (٦/١٧) : هدب التداخل الضوئى المتعدد عند الانعكاس لشعيرة وحيدة المنوال ثابتة معامل انكسار لبها ذات سمك يساوى ٨ ميكرون



شكل رقم (٦/١٨) : هدب التداخل الضوئى المتعدد عند النفاذ لشعيرة عديدة المنوال متدرجة معامل انكسار لبها (سمك الشعيرة = ١٢٥ ميكرون وسمك لبها = ٥٠ ± ١ ميكرون)

٦/٥/٢- الخصائص الضوئية - الحرارية للألياف

Opto-thermal properties of fibres

يتم تعيين تغير معامل انكسار الألياف بتغير درجة حرارتها dn/dT بتكوين هدب فيزو للتداخل الضوئى لمنطقة من الشعيرة مغمورة فى سائل موضوع فى إسفين ضوئى وذلك عند درجات الحرارة .... T_1, T_2 ، وتحسب قيمة $(n_a)_{T_1}$ ، $(n_a)_{T_2}$ من تعيين قيم $\delta Z / \Delta Z$ فى حالتى استخدام ضوء مستقطب فى مستوى مواز لمحور الشعيرة وفى المستوى العمودى عليه أو تحسب قيم معاملات انكسار الألياف عند درجات الحرارة المختلفة بقياس المساحة المحصورة تحت ازاحة الهدبة عندما تعبر الشعيرة - وذلك بمعرفة قيمتى n_L عند كل من درجتى الحرارة T_2, T_1. وكانت نتيجة قياس dn / dT لألياف الاكريلك تساوى ٣,٣ × ١٠$^{-٤}$ / درجة مئوية -Barakat and El-Hennawy,- وقيست هذه القيم لألياف الدرالون المشععة بأشعة جاما (٢٢,٦ ميجاراد) تحت ضغط منخفض -Hamza and Mabrouk, 1988 - وكانت النتيجة كالآتى فى مدى درجات الحرارة من ٢٦ إلى ٣١½°م :

$$dn_a^{\parallel} / dT = -9 \times 10^{-4} \,°C^{-1}$$

$$dn_a^{\perp} / dT = 7.5 \times 10^{-4} \,°C^{-1}$$

٦/٥/٣- دراسة الخصائص الضوئية - الميكانيكية للألياف بطريقة التداخل الضوئى :

Interferometric investigations of opto-mechanical properties of fibres :

يكون للألياف التركيبية المشدودة أو فى حالة شد drawn or extended state قيم متباينة من ناحية الخصائص الضوئية وكذلك الميكانيكية . وتعتمد قيمة هذا التباين degree of anisotropy فى الألياف المشدودة على قيمة الشد الذى وقع على الشعيرة . وتقدم دراسة قيم الخواص الضوئية المتباينة optical anisotropy طريقة مناسبة لتعيين نظام ترتيب الجزيئات فى شرائح من البلمرات .

ولقد طور "Kuhn and Grün" (١٩٤٢) نظرية تعطى العلاقة بين التركيب الجزيئى للبلمرات أحادية المحور uniaxially oriented polymer وخواصها الضوئية المتباينة optical anisotropy .

كما قدم "de Vries" (١٩٥٩) تحليلا للعلاقة بين الانكسار المزدوج ونسبة السحب draw ratio فى حالة الألياف التركيبية .

ودرس "Pinnock and Ward" (١٩٦٤) مجموعة كبيرة من ألياف البولى استر ، لها نسب سحب مختلفة ، كما درسا الخواص الميكانيكية والضوئية لهذه الألياف على أساس نظرى وبمعلومية تنظيم الجزيئات داخل مركباتها .

وتناول "Barakat and Hindeleh" (١٩٦٤b) تأثير الشد على معامل الانكسار والانكسار المزدوج لألياف فسكوز الرايون بالتداخل الضوئى .

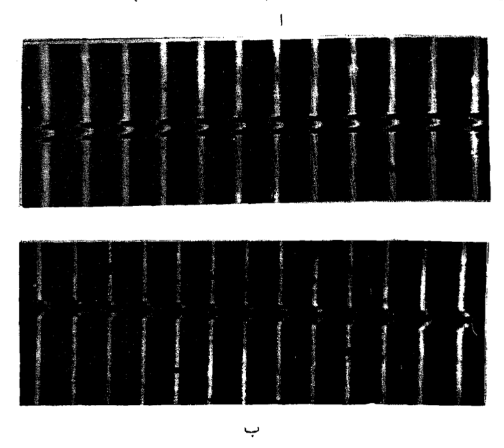
كما درس "Hamza and Kabeel" (١٩٨٧) الخواص الضوئية المتباينة لألياف البولى بروبيلين وتغيرها بتغير نسبة سحب الشعيرات .

ويبين الشكلان (١٩/٦) ، (٢٠/٦) خرائط لهدب فيزو للتداخل الضوئى المتعدد عند نفاذ الأشعة ، وذلك لألياف البولى بروبيلين المشدودة بنسبة سحب ٣ ، ٤ على الترتيب ، وكان الضوء مستقطبا واهتزازاته فى اتجاه محور الشعيرة وكذلك فى الاتجاه العمودى على هذا

المحور . وتم تعيين قيم $n_c^{\perp}, n_c^{\parallel}, n_a^{\perp}, n_a^{\parallel}$ ومقدار تغير الإنكسار المزدوج بتغير نسبة السحب .

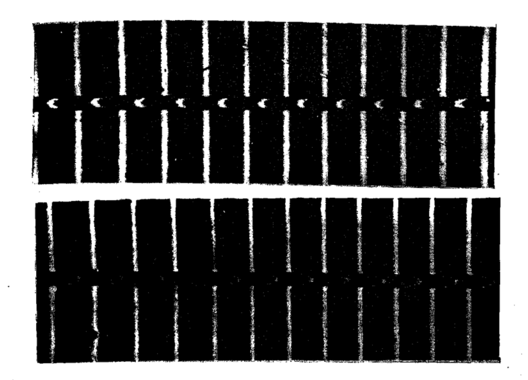
ويبين الشكل رقم (٢١/٦) تركيب جهاز دقيق لقياس الخواص الضوئية – الميكانيكية Opto-mechanical للألياف – (Hamza et al., ١٩٨٧) .

أ

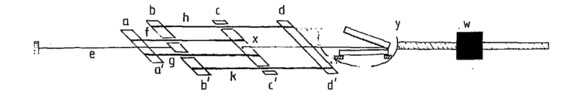


ب

شكل رقم (١٩/٦) : هدب التداخل الضوئى المتعدد عند النفاذ لشعيرة من ألياف البولى بروبيلين ذات نسبة سحب للضوء المستقطب استوائيا : أ) يتذبذب فى اتجاه مواز لمحور الشعيرة ، ب) يتذبذب فى اتجاه عمودى على المحور (من Hamza and Kabeel, 1987)



شكل رقم (٦/٢٠) : هدب التداخل الضوئى المتعدد عند النفاذ لشعيرة من ألياف البولى بروبيلين ذات نسبة سحب ٤ للضوء المستقطب استوائيا : أ) تذبذب فى اتجاه مواز لمحور الشعيرة ، ب) يتذبذب فى اتجاه عمودى على المحور (من Hamza and Kabeel, 1987)



شكل رقم (٦/٢١) : رسم تخطيطى لجهاز شد aá قضيب قابل للحركة ، c´c قضيب منزلق ، g, f قضيبان قابلان للانزلاق ، bb´ ´dd إطار ثابت ، e قضيب مستخدم في شد الشعيرة ، x مثبت لأحد طرفى الشعيرة ، w كتلة قابلة للحركة لجعل الجهاز مستقرا ، y مقياس للتداخل الضوئى . (من (Hamza et al., 1987

٦/٥/٤– تفريق الألياف للضوء Dispersion properties of fibres :

يقاس معدل تغير معامل انكسار الألياف للضوء بالنسبة للتغير فى طول موجة الضوء $dn_a/d\lambda$ بطرق التداخل الضوئى ، وذلك بتطبيق هدب التداخل المتعدد لفيزو أو تطبيق هدب تساوى الرتبة اللونية على الألياف . وتؤدى كلتا الطريقتين إلى تعيين الثوابت B, A لمعادلة « كوشى » للتفرق الضوئى Cauchy's dispersion formula :

$$(n_a)_\lambda = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

وعند تطبق هدب فيزو للتداخل الضوئى تستخدم أطوال موجية مختلفة كمصادر للضوء الذى يسقط على إسفين ضوئى يحتوى على سائل غمرت فيه شعيرة من الألياف ، وتتكون خريطة لهدب التداخل الضوئى لكل طول موجة . ويصدر عن مصباح الزئبق أو مصباح الزئبق – كادميوم عدد مناسب من الخطوط الطيفية التى تعطى الطول الموجى المطلوب باستخدام مرشح ضوئى مناسب .

ويمكن قياس قيمة ($\frac{\delta Z}{\Delta Z}$) فى كل حالة من حالتى استقطاب الضوء واهتزازاته فى الاتجاه الموازى لمحور الشعيرة والاتجاه العمودى عليه ، ونستنتج قيمة $(n_a^{\parallel})_\lambda$, $(n_a^{\perp})_\lambda$ ومدى تغير كل منها بالنسبة إلى $1/\lambda^2$.

ويمكن تعيين قيمتى الثابتين B, A لمعادلة « كوشى » للتفرق الضوئى فى حالة التفرق العادى normal dispersion ، أى عندما تكون العلاقة بين n_a, $1/\lambda^2$ تمثل خطا مستقيما .

وطبق "Hamza and Mabrouk" (١٩٨٨) طريقة فيزو على ألياف الدرالون المشعة بأشعة جاما وبجرعة إشعاعية مقدارها ٢٢,٥٥٩ ميجاراد مستخدمين الأطوال الموجية الصادرة من مصباح الزئبق ، وكان الضوء مستقطبا واهتزازاته فى الاتجاه الموازى على محور الشعيرة ، وتم حساب قيمتى ثابتى معادلة « كوشى » :

$$A = 1.5149 \quad \text{and} \quad B = 15.53 \times 10^2\ (nm)^2$$

٦/٥/٥– هدب تساوى الرتبة اللونية : Fringes of equal chromatic order

بإسقاط هدب فيزو للتداخل الضوئى المتعدد التى تم الحصول عليها بالطريقة التى سبق

ذكرها على فتحة المطياف prism or grating spectrograph ، واستبدال المصدر الضوئى أحادى اللون بمصدر ضوئى أبيض (pointolite) ، ويضبط حافة الإسفين الضوئى لكى تكون موازية لفتحة المطياف – تتكون هدب تساوى الرتبة اللونية وتظهر على هيئة خطوط مستقيمة فى منطقة السائل (Tolansky, 1960) . وعندما تعبر هذه الهدب الشعيرة تحدث إزاحات تختلف باختلاف طول موجة الضوء وباختلاف مستوى استقطاب اهتزازات الضوء (مواز أو عمودى على محور الشعيرة) .

ويوضح الشكل (٦/٣) – السابق – النظام البصرى المستخدم للحصول على هدب تساوي الرتبة اللونية (FECO) ، وعندما لاتعانى الهدبة أية إزاحة عندما تعبر الشعيرة يدل ذلك على أن معامل انكسار مادة الشعيرة n_a يساوى معامل انكسار السائل n_L عند طول موجة الضوء λ_1 أى حالة مضاهاة . وعند تغير درجة الحرارة قليلا فإن المضاهاة بين معاملى انكسار السائل والشعيرة تتم عند طول موجى آخر λ_2 ، ويتم رسم منحنيات تفرق السائل للضوء فى المدى المستخدم من الأطوال الموجية ودرجات الحرارة بين T_1, T_2 وذلك باستخدام مقياس معامل الانكسار ومنظم لدرجات الحرارة Thermostat ومصدر ضوئى أحادى طول الموجة . ويمكن تعيين معامل انكسار مادة الشعيرة n_a عند الطول الموجى المطلوب وذلك من هذه المنحنيات ، ويمكن كذلك تعيين ثابتى معادلة « كوشى » للتفرق الضوئى عندما يكون هذا التفرق عاديا normal dispersion . ولقد طبق "Barakat and Hindeleh" (١٩٦٤) هذه الطريقة على ألياف رايون الفسكوز وتم حساب ثابتى كوشى ، وكانت النتيجة كما يلى :

$$A = 1.5391 \quad \text{and} \quad B = 266.666\ (\text{nm})^2$$

واستخدمت هدب تساوى الرتبة اللونية FECO لتعيين معامل الانكسار المزدوج لألياف الاكريلان Barakat and El-Hennawi, 1971 .

وقد نشر "Hamza" (١٩٨٦) ملخصا شاملا لتطبيقات هدب فيزو للتداخل الضوئى وهدب تساوى الرتبة اللونية على الألياف – جدول رقم (٦/١) – ونوصى بالرجوع إلى المراجع الاصلية المذكورة فى هذا الجدول للحصول على تفاصيل أكثر .

Table 6.1 Application of multiple-beam interferometry to the study of fibre properties.

Author	Method	Object of study and application	Results
Faust (1952, 1954)	Multiple-beam interferometry	Determination of refractive index variation within optically heterogeneous specimens	The skin effect in rayon fibres is discussed and values of $n^{\parallel}$ and $n^{\perp}$ for both skin and core are given
Barakat and Hindeleh (1964a)	Multiple-beam interferometry	To determine refractive indices and birefringence of mohair wool fibres	Variation of refractive indices and birefringence along the fibre axis is given. Thermal coefficient of refractive index of the mohair fibre is determined and found to be 7.5×10^{-5} °C^{-1}
Barakat and Hindeleh (1964b)	Multiple-beam interferometry	To determine refractive indices, birefringence and tensile properties of viscose rayon fibres	The birefringence of viscose rayon fibres is increased by increasing the tenacity of these fibres
Barakat (1971)	Multiple-beam interferometry	Derivation of mathematical expression for the shape of multiple-beam Fizeau fringes and associated white light fringes of equal chromatic order crossing a fibre of circular cross section having a core surrounded by a skin	The refractive indices and birefringence can be calculated for both skin and core of such fibres. The optical power of a cylindrical fibre was calculated for a parallel beam of monochromatic light incident on the fibre
Barakat and El-Hennawi (1971) Barakat et al (1975)	Multiple-beam Fizeau fringes and the white fringes of equal chromatic order	Measurement of refractive indices and birefringence of acrylic and camel - hair fibres	For acrylic fibres, $n^{\parallel} = 1.518$, $n^{\perp} = 1.519$ and $\Delta n = -0.001$ at 35°C For camel-hair fibres, $n^{\parallel} = 1.559$, $n^{\perp} = 1.546$ and $\Delta n = 0.013$ at 21.5°C
Hindeleh (1978), Hamza and Sokkar (1981)	Multiple-beam Fizeau fringes	Study of the optical anisotropy in cotton fibres	The values of the mean refractive indices $n_a^{\parallel}$ and $n_a^{\perp}$ and birefringence of cotton fibres differ for different varieties
Krishna Iyer et al (1969)	White light fringes of equal chromatic order		
Hamza et al (1980 a,b)	Immersion and multiple-beam Fizeau methods	Investigation of the difference in mean orientation of skin and core, for polyethylene and polypropylene fibres.	The refractive indices of each layer of the fibre and their variations with wavelength of light were determined
El-Niklawy and Fouda (1980 a,b), Fouda and El-Niklawy (1981), Fouda et al (1981), Hamza et al (1982)	Fizeau method	Derivation of mathematical expressions for the shape of multiple-beam Fizeau fringes and their application to determine refractive indices of multiple-skin fibres	The optical properties of multiple-skin fibres of elliptical, rectangular, kidney and dog-bone cross sections are given
Barakat and El-Hennawi (1971), Hamza and Abd El-Kader (1983).	Fizeau method	Description of a method suitable for evaluating small birefringence in fibres and its application to acrylic and cuprammonium fibres	The results are in good agreement with those obtained from the double - beam microinterferometric method
Sokkar and Shahim (1985), Hamza et al (1984, 1985 a,b,c)	Double-beam and multiple-beam microinterferometry.	Determination of the optical anisotropy of fibres with irregular transverse sections.	Accurate results are obtained when considering the area under the interference fringe shift represented by the path difference integrated across the fibre. Values of refractive indices and birefringence for the skin and core of a fibre having irregular transverse sections are given

References

Barakat N 1957 Proc. Phys. Soc B IXX 220
Barakat N 1971 Textile Res. J. **41** 167
Barakat N and El-Hennawi H A 1971 Textile Res. J. **41** 391
Barakat N, Hamza A A and Fouda 1975 Egypt. J. Phys. **6** 91
Barakat N, Hamza A A and Goneid A S 1985 Appl. Opt. **24** 4383
Barakat N, and Hindeleh A M 1964a Textile Res. J. **34** 357
Barakat N, and Hindeleh A M 1964b Textile Res. J. **34** 581
Barakat N, and Mokhtar S 1963 J. Opt. Soc. Am. **53** 159
Brossel J 1947 Proc. Phys. Soc. **59** 224
El- Hennawi H A 1988a Egypt. J. Phys. in press
El- Hennawi H A 1988b Egypt. J. Phys. in press
El- Hennawi H A 1988c Egypt. J. Phys. in press
El- Nicklawy M M and Fouda I M 1980a J. Textile Inst. **71** 252
El- Nicklawy M M and Fouda I M 1980b J. Textile Inst. **71** 257
Faust R C 1952 Proc. Phys. Soc. **B 65** 48
Faust R C 1954 Proc. Phys. Soc. **B 67** 138
Feussner W 1927 Gehrckés Handbook der Physik Optik vol. 1
Fouda I M and El-Nicklawy M M 1981 Acta Phys. Polon. **A 59** 95
Fouda I M, Hamza A A, El-Nicklawy M M and El-Farahaty K A 1981 Textile. Res. J. **51** 355
Gloge D and Marcatili E A J 1973 Bell Syst. Tech. J. **52** 1563
Hamza A A 1980 Textile Res. J. **50** 731
Hamza A A 1986 J. Microsc. **142** 35
Hamza A A and Abd El-Kader H I 1983 Textile Res. J. **53** 205
Hamza A A, Fouda I M and El-Farahaty K 1982 Acta Phys. polon. A **61**129
Hamza A A, Fouda IM, El-Faeahaty K A and Badawy Y K M 1980a Textile Res. J. **50** 592
Hamza A A,Fouda I M and El-Farahaty K A and Badawy Y K M 1980b Acta Phys. Polon. A **58** 651
Hamza A A, Fouda I M, El-Farahaty K A and Helaly S A 1987 Polym. Test. 7 329

Hamza A A, Fouda I M, Hashish A H and El-Farahaty K A 1984 Textile Res. J. **54** 802
Hamza A A and Kabeel M A 1986 J. Phys. D : Appl. Phys. **19** 1175
Hamza A A and Kabeel M A 1987 J. Phys. D : Appl. Phys. **20** 963
Hamza A A and Mabrouk M A 1988 Radiat. Phys. Chem, **32** 645
Hamza A A and Sokkar T Z N 1981 Textile Res. J. **51** 485
Hamza A A, Sokkar T Z N and Kabeel M A 1985a J. Phys. D : Appl. Phys. **18** 1773
Hamza A A, Sokkar T Z N and Kabeel M A 1985b J. Phys. D : Appl. Phys. **18** 12321
Hamza A A, Sokkar T Z N and Kabeel M A 1986 J. Phys. D : Appl. Phys. **19** L19
Hamza A A, Sokkar T Z N and Shahin M M 1985c J. Microsc. **137** 85
Hindeleh A M 1978 J. Phys. D : Appl. Phys. **11** 2335
Krishna Iyer K R, Neeleakantan P and Radhakrishnan T 1969 J. Appl. Polym. Sci. **7** 983
Kuhn W and Grün F 1942 Kolloid Z. **101** 248
Marhic M E, Ho P S and Epstein M 1975 Appl. Phys. Lett. **26** 574
Mokhtar S 1964 Ph D Thesis Ain Shams University, Egypt
Saunders M J and Gardner W B 1977 Appl. Opt. **16** 2368
Simmens S C 1958 Nature **18** 1260
Sokkar T Z N and Shahin M M 1985 Textile Res. J **55** 139
Pinnock P R and Ward I M 1964 Br. J. Appl. Phys. **15** 1559
Tolansky S 1948 Muliple- Beam Interferometry (Oxford : Clarendon)
Tolansky S 1960 Surface Microtopography (London : Longmans, Green)
de vries H 1959 J. Polym. Sci. **34** 761

الفصل السابع
دراسة طبغرافية سطح الألياف بالتداخل الضوئى
Interferometric Determination of Fibre Surface Topography

استخدمت طرق التداخل الضوئى لفحص أسطح المواد للتعرف على معالم وتفاصيل تضاريسها . وطبقت كل من طرق التداخل الضوئى الثنائى والمتعدد لإجراء هذا الفحص . وأجرى « تولانسكى Tolansky » ومجموعته (١٩٤٨ ، ١٩٥٢ ، ١٩٦٠) دراسة مكثفة لطبغرافية البلورات وكذلك أسطح المعادن . واستخدمت فى هذا المجال هدب التداخل الضوئى المتعدد محددة الموقع عند النفاذ وعند الانعكاس .

٧/١- تطبيق هدب التداخل الضوئى المتعدد محددة الموقع النافذة لدراسة طبغرافية الأسطح :

Multiple-beam localised interference systems in transmission applied to surface topography :

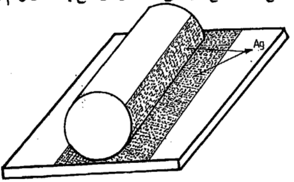
تم فى الفصل السادس شرح النظام البصرى المستخدم للحصول على هدب التداخل الضوئى المتعدد الذى طوره « تولانسكى Tolansky » لدراسة تضاريس أسطح الأجسام الشفافة وهو نفس النظام الذى استخدم لتعيين معامل انكسار الألياف باستخدام طريقة التداخل الضوئى المتعدد عند النفاذ فيما عدا طريقة تكوين مقياس التداخل الضوئى .

ففى حالة فحص الخواص الضوئية للألياف تغمر الشعيرة فى سائل موضوع بين مسطحين ضوئيين مفضضين يميل أحدهما على الآخر ، بينما فى حالة دراسة طبغرافية سطح من مادة شفافة - كالألياف مثلا - فإن هدب فيزو للتداخل الضوئى المتعدد تتكون من الأشعة المنعكسة من السطح المراد فحصه ومن مسطح ضوئى يعتبر مرجعا .

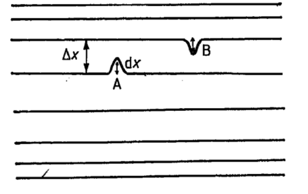
وتتكون مجموعة الهدب هذه فى مكان محدد فى الفراغ يقع بالقرب من مقياس التداخل الضوئى ، ويغطى السطحان بطبقة من الفضة لها انعكاسية كبيرة وتفاذيتها جزئية ، وذلك بالتبخير الحرارى للفضة عند ضغط منخفض (أقل من 10^{-5} تور) . وتوضع الشعيرة وكذلك

المسطح الضوئى بعد تغطيتها بطبقة من الفضة فى حامل "Jig" لتكون مقياس التداخل الضوئى – شكل رقم (١/٧) – الذى يحصر شريحة من الهواء . وتتكون هدب فيزو للتداخل الضوئى عند النفاذ . وتظهر هذه الهدب على هيئة خطوط مستقيمة حادة ومضيئة موازية لمحور الشعيرة . ويتناقص البعد بين كل هدبتين كلما بعدنا عن محور الشعيرة . وتظهر التفاصيل الدقيقة المكونة لطبغرافية سطح الشعيرة على شكل تعرجات فى الهدب نتجت من الارتفاعات والانخفاضات الموجودة على سطح الشعيرة .

ويمكن تعيين نصف قطر الشعيرة عند المقاطع العرضية المختلفة ، وذلك من البعد بين الهدب المتتالية عند موقع كل مقطع عرضى كما هو موضح بالشكل رقم (٢/٧) .



شكل رقم (١/٧) : مقياس تداخل ضوئى لتعيين تضاريس سطح شعيرة باستخدام هدب التداخل الضوئى عند النفاذ



شكل رقم (٢/٧) : شكل هدب التداخل الضوئى المتعدد محددة الموقع ، تظهر على هيئة خطوط مستقيمة حادة مضيئة عند النفاذ وخطوط معتمة عند الانعكاس ، موازية لمحور الشعيرة . يتناقص البعد بين كل هدبتين متجاورتين كلما تحركتا بعيدا عن محور الشعيرة ، طبقا لانحناء سطح الشعيرة . تمثل الإزاحة A ارتفاعا على سطح الشعيرة إذ أنها فى اتجاه زيادة فجوة مقياس التداخل t_g فى حين أن الازاحة B تنتج من انخفاض على سطح الشعيرة .

٢/٧- تطبيق هدب التداخل الضوئى محددة الموقع عند الانعكاس لدراسة طبغرافية الأسطح

Multiple-beam localised interference systems at reflection applied to surface topography :

طبق « تولانسكى Tolansky » ومجموعته هدب فيزو للتداخل الضوئى المتعدد عند الإنعكاس لفحص أسطح مجموعة متنوعة من البلورات التى تتضمن الميكا والسيلينت والكوارتز للتعرف على معالم هذه الأسطح ومعالم النمو البللورى لبلورة كربيد السيليكون بقياس ارتفاع كل درجة من درجاتها ، وكذلك قياس أبعاد الحفر الناتجة عند أسطح الأجسام لتقدير صلابتها . ويشابه النظام البصرى المستخدم فى هذه الحالة النظام البصرى الذى تم شرحه فى الفصل الرابع فيما عدا تركيب مقياس التداخل الضوئى .

وسندرس الآن تكون مقياس التداخل الضوئى وهو من السطح المراد فحصه ومسطح ضوئى مفضض بحيث يمكن - باستخدام ميكروسكوب - رؤية منطقة معينة من السطح وهى فى وضع أفقى بالنسبة للأشعة الساقطة على مقياس التداخل الضوئى . والمكون العلوى لمقياس التداخل الضوئى - كما ذكرنا - هو مسطح ضوئى يواجه الضوء الساقط ويغطى المكون الأول لهذا المقياس . أى المسطح المرادفحصه - بطبقة سميكة من الفضة ، بينما يغطى المكون الثانى - المسطح الضوئى - بطبقة رقيقة من الفضة انعكاسيتها R ≈ ٧٠٪ ونفاذيتها T ≈ ٢٢٪ . ويضم المكونان مع بعضهما فى حامل Jig مناسب ليكونا مقياس تداخل ضوئى يحصر شريحة هواء ، كما فى الشكل رقم (٣/٧) .

ويستخدم ميكروسكوب لملاحظة هدب التداخل الضوئى المتكونة والمحددة الموقع وتكون شيئية الميكروسكوب لها اتساع زاوى angular aperture مناسب لتجمع كل الأشعة المؤثرة الداخلة فى تكوين الهدب . فإذا كان طول موجة الضوء فى الهواء هو λ فإن الهدب المتكونة تظهر على شكل هدب حادة معتمة على خلفية مضيئة ترسم خريطة تضاريس السطح ، وهى نتيجة تقاطع مستويات توازى المسطح الضوئى الداخل فى تكوين مقياس التداخل ، ويبعد كل مستوى عن مجاوره بمسافة تساوى $\lambda/2$ ، أى أن هدب التداخل التى تظهر هى فى الواقع منحنيات تساوى سمك شريحة الهواء المحصورة بين السطح المراد تسجيل تضاريسه والمسطح الضوئى . أى أنها تقع على مستوى وتتكون مجموعة الهدب المغلقة التى لاتتقاطع

عند الارتفاعات والانخفاضات ويختلف البعد بين كل هدبة وأخرى . وتعتمد المسافة بين كل هدبتين متتاليتين fringe spacing على زاوية ميل مكونى مقياس التداخل الضوئى . وتعين طبغرافية السطح المجهولة كميا بقياس مقدار الإزاحة الجانبية للهدبة dx المقابلة للارتفاع h أو الانخفاض على سطح الشعيرة من المعادلة :

$$h = \Delta m \ (\lambda / 2) \qquad (7.1)$$

حيث :

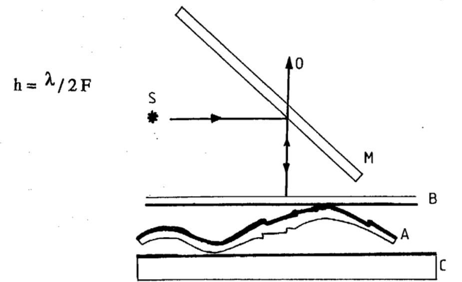
$$\Delta m = (dx / \Delta x)$$

و Δx هى المسافة بين هدبتين متتاليتين ، كما فى الشكل رقم (٢/٧)

وبذلك يمكن تعيين قيمة h بمعرفة Δ m .

وإذا كانت الانعكاسية عالية فإنه يمكن قياس تضاريس السطح ذات الارتفاعات الصغيرة جدا . وإزاحة الهدبة التى تساوى نصف عرضها يمكن قياسها بسهولة وهى تقابل :

$$h = \lambda / 2F$$



شكل رقم (٣/٧) : مقياس التداخل لتعيين طبغرافية سطح بلوزة الميكا وفيه تظهر شريحة من الميكا تم انفلاقها حديثا ومفضض أحد سطحيها بطبقة سميكة ويمثله فى الشكل A فى حين أن المسطح الضوئى ويمثله B قد غطى بطبقة من الفضة نافذة جزئيا للضوء . وضعا بحيث يحصران شريحة رقيقة من الهواء ، وعند إضاءة المقياس تتكون هدب التداخل المتعدد عند الانعكاس . S يمثل حزمة متوازية من الأشعة وحيدة الطول الموجى و M مجزئ للأشعة ، C دعامة ، O فى اتجاه شيئية الميكروسكوب والكاميرا .

والقيمة λ تساوى ٥٥٠٠ أنجستروم والـ finesse F = ٤٠ ، h تساوى ٧٠ أنجستروم تقريبا – Born and Wolf,١٩٨٠ – ويتحدد شكل السطح ومايميزه من ارتفاعات وانخفاضات بملاحظة اتجاه حركة الهدب عند تغيير المسافة بين مكونى مقياس التداخل الضوئى . وينطبق هذا على النظام البصرى لتكوين هدب التداخل الضوئى عند النفاذ وعند الانعكاس . ففى الحالة الأولى يمكن التفريق بين مرتفع hill ومنخفض valley على السطح باستخدام أكثر من طول موجى . وتعتمد درجة القياسات على جودة quality هدب التداخل الضوئى .

وقد درس "Holden" (١٩٤٩) بعض البارامترات التى تحكم هدب فيزو للتداخل الضوئى عند الانعكاس ، وبذلك جعل هذه الطريقة مفيدة فى كثير من التطبيقات . وأفاد أنه باستخدام تغطية بطبقة من الفضة انعكاسيتها عالية بينما درجة امتصاصها للضوء قليلة تكون هدب التداخل الضوئى عند الانعكاس أكثر حدة من الهدب المماثلة لها والناتجة من نفاذ الأشعة . لكن الحد الأدنى للشدة الضوئية عند الانعكاس وتعتمد على امتصاص الطبقة الموجودة على مدخل مقياس التداخل الضوئى التى تواجه الشعاع الساقط . وفى الحقيقة فإن الخصائص الطورية الضوئية optical phase لهذه الطبقة أى قيمة F لها ، حيث :

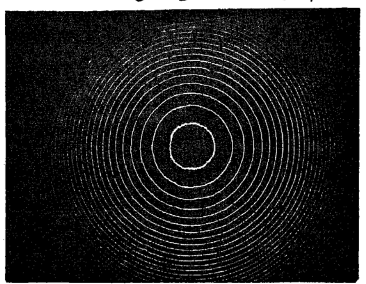
$$F = 2\gamma - (\beta_1 + \beta_2)$$

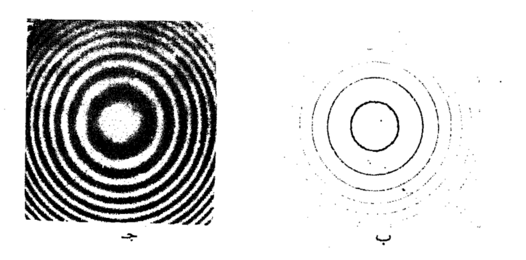
هى التى تحكم توزيع الشدة الضوئية فى حالة هدب فيزو للتداخل الضوئى عند الانعكاس – حيث γ هى التغير فى الطور عند نفاذ الأشعة من الطبقة ، β_1 ، β_2 هما التغير فى الطور للأشعة المنعكسة عند السطح الفاصل (الهواء – الطبقة) air-layer ومادة الدعامة أى الخلفية – الطبقة substrate-layer ، كما هو موضح فى الفصل الرابع .

وقد استخدمت هدب التداخل الضوئى المتعدد متساوية الرتبة اللونية multiple-beam fringes of equal chromatic order لفحص طبغرافية أسطح البلورات – ١٩٦٠ ، Tolansky – وتم فى الفصل السادس شرح النظام البصرى المستخدم .

وللمقارنة بين نتيجة استخدام هدب التداخل الضوئى المتعدد وهدب التداخل الضوئى الثنائى لتعيين التفاصيل الدقيقة لتضاريس الأسطح يبين الشكلان (٧/٤/أ ، ب) خريطتين

لهدب التداخل الضوئى لسطح كرى من مادة شفافة باستخدام هدب التداخل الضوئى المتعدد النافذة وعند الانعكاس على الترتيب ، بينما يوضح الشكل رقم (٤/٧/جـ) الخريطة باستخدام هدب التداخل الضوئى الثنائى . ويتضح من هذه المقارنة أن هدب التداخل الضوئى المتعدد حادة جدا ودقيقة وتكشف عن التفاصيل الدقيقة على سطح الأشياء التى تفقد تماما فى حالة استخدام هدب التداخل الضوئى الثنائى .





شكل رقم (٤/٧) : (أ) هدب التداخل الضوئى المتعدد عند النفاذ ، (ب) هدب التداخل الضوئى المتعدد عند الانعكاس ، (جـ) هدب التداخل الضوئى الثنائى لنفس السطح الكرى المستخدم فى (أ) ، (ب) .

٣/٧- استخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى لدراسة طبغرافية أسطح الألياف

The application of interference microscopy to the study of surface topography.

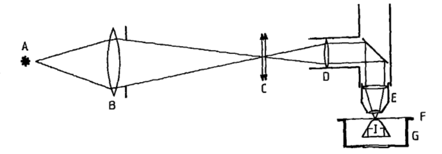
تم استخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى فى دراسة طبغرافية أسطح الألياف النسجية -Skretchly 1954, Howell and Mazur 1953, Simmens 1954 - وكذلك الألياف البصرية - Barakat et al. 1986 . وفى أحد هذه الدراسات طبق "Skretchly" (١٩٥٤) الطريقة التى طورها تولانسكى Tolansky (١٩٥٢) لدراسة معالم النمو البللورى وذلك لدراسة طبغرافية سطح بعض ألياف الكيراتين Keratin fibres وفى هذه الطريقة الأخيرة تعالج الشعيرات أولا بمحلول كندابلسم Canda balsam . المذاب فى البنزين وبعد تجفيف الشعيرات يكون هذا المحلول طبقة رقيقة من هذه المادة . سمكها حوالى ٢ ميكرومتر - على الشعيرات ، ويتبع السطح الداخلى لهذه الطبقة تفاصيل الشكل الخارجى للشعيرة .

وتوضع شعيرة من هذه الألياف على شريحة زجاجية وتثبت من طرفيها بمادة لاصقة . ويستخدم ميكروسكوب وتوضع العينة فى مكانها وتضاء باستخدام ضوء أحادى طول الموجة، وتظهر فى مجال رؤية الميكروسكوب هدب التداخل الضوئى المتكونة بالانعكاس . وتتكون هذه الهدب بالتداخل الضوئى بين الأشعة المنعكسة عند سطحى الكندابلسم ، ويعمل السطح الزجاجى كسطح مرجع . وفى هذه الحالة يستخدم الضوء المنعكس ولايكون لتأثير الشعيرة كعدسة أثر على التداخل الضوئى .

واستخدم " Howell and Mazur " (١٩٥٣) طريقة للحصول على حلقات نيوتن لدراسة مواقع الالتقاء contact areas وتهدف هذه الطريقة إلى دراسة الاحتكاك فى الألياف .

كما وصف " Simmens" (١٩٥٤) طريقة مبسطة تقوم على التداخل الضوئى لفحص تضاريس سطح الألياف والفتائل filaments ، ويبين الشكل رقم (٥/٧) النظام البصرى المستخدم وهو يماثل النظام البصرى المستخدم للحصول على حلقات نيوتن . وفى

طريقة Simmens يكون التداخل بين الأشعة المنعكسة من الشعيرة ومن سطح مرجع reference plate ، وتظهر الشعيرة محاطة بمجموعة من هدب التداخل الضوئى وهى تمثل منحنيات تساوى الارتفاع مقاسة من المستوى المرجع .



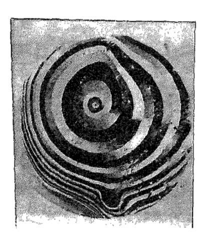
شكل رقم (٥/٧) : النظام البصرى المستخدم لفحص طبغرافية أسطح الألياف(Simmens 1954)، A مصدر ضوئى أحادى طول الموجة ، B فتحة دائرية وعدسة مجمعة تكون صورة للمصدر على فتحة مستطيلة D, C مجموعة ضوئية تشمل عدسة وسطحا عاكسا وعدسة مجمعة ، E شيئية ميكروسكوب ، F دعامة ، I الشعيرة .

ويلاحظ أنه فى جميع النظم البصرية التى تم شرحها فى هذا الصدد تتكون هدب تداخل ضوئى محددة الموقع localised fringes قريبة من مقياس التداخل الضوئى - سواء كانت عند النفاذ أو عند الانعكاس أو باستخدام التداخل الضوئى الثنائى أو المتعدد - وتكبر هذه الهدب وتسجل على فيلم حساس وتستخدم شيئية الميكروسكوب ذات قوة تكبير صغيرة حتى يكون العمق البؤرى depth of focus كافيا لتكون الهدب محددة المعالم على امتداد مساحة مناسبة .

واستخدم ميكروسكوب التداخل الضوئى زايس - لنيك Zeiss-Linnik interference microscope (ZLIM) لتعيين تضاريس سطح الأجسام . وقد أعطيت فى الفصل التاسع فكرة تفصيلية عن تركيب هذا الميكروسكوب ومسار الضوء فيه وطريقة تشغيله للحصول على هدب تداخل ضوئى ثنائى ذات درجة تكبير عالية .

واستخدم « بركات Barakat » (١٩٦١) ميكروسكوب ZLIM لفحص معالم النمو البللورى لسطح بللورة كربيد السيليكون silicon carbide ، ويبين الشكل رقم (٦/٧) خريطة هدب التداخل الضوئى لمعالم النمو البللورى الحلزونى لأحد أسطح بللورة كربيد السيليكون -

وقد تم فى النظام البصري المستخدم الحصول علي هدب Mitchell et al. ١٩٥٨ – التداخل على هيئة منحنيات يرسمها الضوء تظهر معالم الحلزون ويعطى الفرق بين الشدة الضوئية عند طبقتى حلزون متتابعتى البعد الفراغى بينهما .



شكل رقم (٦/٧) : هدب التداخل الضوئى الثنائى التى تحيط بمعالم النمو البللورى التى تظهر على سطح بللورة كربيد السيليكون فى شكل حلزون وذلك باستخدام مقياس التداخل لزايس – لينيك .

واستخدم "Barakat et al" (١٩٨٦) ميكروسكوب التداخل الضوئى زايس – لنيك (ZLIM) لدراسة تضاريس سطح الألياف البصرية الملحومة بالانصهار fusion-spliced optical fibres . وتهدف هذه الطريقة إلى مراقبة وفحص جودة عملية اللحام حيث يحتاج نظام التراسل الضوئى إلى استخدام طرق للحام ووصل الألياف وتعتبر كمية الفقد فى الشدة الضوئية الناتجة من عملية اللحام والوصل عاملا هاما فى تكوين والحفاظ على كفاءة نظام التراسل الضوئى بالألياف البصرية ، حيث إن هذه العملية يمكن أن تؤثر تأثيرا ملحوظا فى الفقد فى وصلات التراسل متعددة الكيلومترات .

وقد اختيرت شعيرة من الألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار GRIN قطر لبها ٥٠ ميكرومتر وقطر قشرتها ١٢٥ ميكرومتر ، واستخدم جهاز اللحام بالانصهار Siecor M67 fusion splicer . وتم فصل الطبقة البلاستيكية الخارجية عند نهايتى الشعيرتين المطلوب لحامهما ، ثم نظفت هاتان النهايتان ، واستخدم قاطع للألياف fibre cutter لإجراء قطع مثالى لهاتين النهايتين . وأجرى انصهار مبدئى لهاتين النهايتين لإزالة الشوائب ثم تقرب من

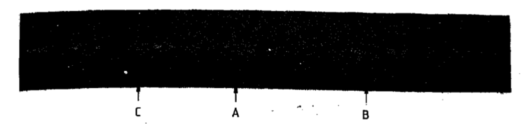
بعضهما وتلحم . واستخدم ميكروسكوب التداخل الضوئى ZLIM لتعيين تضاريس سطح الألياف بعد لحامها . ويتم التداخل بين الشعاعين المنعكسين أحدهما من مرآة مستوية تستخدم كمرجع reference plane mirror والشعاع الآخر منعكس من سطح الشعيرة المراد فحصها .

وتختار انعكاسية المرآة المرجع بحيث تكون مقاربة لانعكاسية الشعيرة واستخدم مصباح الثاليوم كمصدر ضوئى أحادى اللون ذى طول موجه λ تساوى ٥٣٥ نانومتر . ويوجد أيضا مصباح ضوئى أبيض ليحل محل المصدر أحادى طول الموجة وذلك لتكوين هدب تداخل ضوئى بيضاء ذات رتبة منخفضة low-order white light fringes وتوضع الشعيرة الملحومة فى حامل "Jig" بحيث يكون الجزء المراد فحصه عموديا على الضوء الساقط

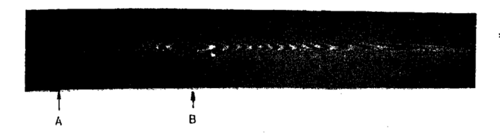
ويبين الشكل رقم (٧/٧) خريطة هدب التداخل الضوئى للجزء الملحوم من شعيرة متدرجة معامل الانكسار GRIN وتم الحصول على هذه الخريطة باستخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى ZLIM عند الطول الموجى ٥٣٥ نانومتر .

وتظهر مجموعتان من الهدب المغلقة Two-closed fringe systems عند C, B على جانبى نقطة اللحام A نتيجة لتحديب buckling مادة الشعيرة الناتج من عملية اللحام ، ويستنتج ارتفاع هذا التحديب h من المعادلة رقم (١/٧) بمعلومية Δn (عدد هدب التداخل الضوئى المحصورة بين B, A أو المحصورة بين C, A) ويضاف جزء آخر عند مركز الهدب . وكان ارتفاع التحديب عند C, B هما ٦,٧ ، ٢,٩ ميكرومتر على الترتيب بينما تبعد النقطتان C, B عن بعضهما مسافة ٣٠٠ ميكرومتر .

ويبين الشكل رقم (٨/٧) خريطة هدب التداخل الضوئى لجزء من شعيرة ملحوم بدءا بنقطة اللحام A مرورا بنقطة التحديب عند B وتستمر الخريطة لتغطى الجزء البعيد عن نقطة اللحام unperturbed من الشعيرة ، حيث تظهر الهدب على هيئة خطوط مستقيمة موازية لمحور الشعيرة .



شكل رقم (٧/٧) : هدب التداخل الضوئى لموقع اللحام فى شعيرة ضوئية متدرجة معامل انكسار لبها (من Barakat et al. 1986)



شكل رقم (٨/٧) : هدب التداخل الضوئى لموقع اللحام لشعيرة ضوئية عند النقطة A ، وتظهر مجموعة من الهدب المغلقة عند النقطة B دلالة على وجود انتفاخ أو تحديب لمادة الشعيرة عند موقع اللحام (من Barakat et al. 1986)

وقدم "Barakat et al. " (١٩٨٦) فى هذا البحث مقارنة بين متوسط الارتفاعات المكونة للتحديبات التى نتجت من عملية اللحام والفقد فى شدة الأشعة النافذة المقابل لهذه التحديبات . ونتج عن هذه الدراسة أنه كلما زاد ارتفاع التحديب يزيد الفقد فى شدة هذه الأشعة ، مع الأخذ فى الاعتبار أن حجم التحديب لابد أن يكون فى حدود ميكرومتر واحد . وتسمح هدب التداخل الضوئى المستقيمة والموازية لمحور الشعيرة – والمتكونة بواسطة الجزء الإسطوانى البعيد عن مناطق اللحام من الشعيرة – تسمح بتعيين قطر الشعيرة (d) على امتداد محور الشعيرة باستخدام المعادلة :

$$d = (D^2_m / m) \left(\frac{1}{2\lambda}\right) \qquad (7.2)$$

حيث D_m هى المسافة بين كل هدبتين مستقيمتين لهما نفس الرتبة m ومقسومة على تكبير الصورة وعين قطر الشعيرة من ميل الخط المستقيم الناتج من رسم العلاقة بين m, D^2_m .

وأعطت قيم قطر الشعيرة المحسوبة بهذه الطريقة درجة دقة تساوى ± ١ ميكرومتر عندما كان قطر الشعيرة حوالى ١٢٦ ميكرومتر .

References

Barakat N 1961 *Zeiss-Mitteilungen (Heft. FRG.)* **6** 325

Barakat N, El-Hennawi H A, Medhat M, Sobie M A and El-Diasti F 1986 *Appl. Opt.* **25** 3466

Born M and Wolf E 1980 *Principles of Optics* (Oxford : Pergamon) p357

Holden J 1949 *Proc. Phys. Soc.* B **62** 405

Howell H G and Mazur J 1953 *J. Textile Inst.* **44** T59

Mitchell P, Barakat N and El-Shazly E 1958 *Z. Kristallogr.* **III** 1

Simmens S C 1954 *J. Textile Inst.* **45** T 569

Skretchly A 1954 *J. Textile Inst.* **45** T 78

Tolansky S 1984 *Multiple-Beam Interferometry of Surfaces and Films* (Oxford : Clarendon)

——— 1952 N*ature* **170** 4315

——— 1960 *Suface Microtopography* (London : Longmans, Green)

الفصل الثامن

تأثير التشعيع على الخواص الضوئية للألياف

The Effect of Irradiation on the Optical Properties of Fibres

يتناول هذا الفصل تأثير التشعيع على الخواص الضوئية للألياف ، ويتضمن قسمين ، القسم الأول (١/٨) نتناول فيه دراسة تأثير أشعة جاما وكذلك التشعيع بالنيوترونات على الخواص الضوئية (الامتصاص الضوئى) للألياف البصرية ، بينما يقدم القسم الثانى (٢/٨) تأثير أشعة جاما على معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف التركيبية والنسيجية والبصرية .

١/٨- تأثير التشعيع بأشعة جاما وبالنيوترونات على امتصاص الألياف البصرية للضوء

The effect of γ and neutron irradiation on the optical absorption of optical fibre waveguids:

عند تعريض ألياف بصرية لإشعاع نووى nuclear radiation فإن امتصاص الألياف للضوء يزيد وهذا الامتصاص المستحث induced absorption يسبب فقدا مستحثا induced loss وزيادة فى فقد أو اضمحلال الأشعة التى تنقلها هذه الألياف . ويؤخذ فى الاعتبار هذا الامتصاص المستحث بالإشعاع عندما تستخدم نظم التراسل الضوئى فى جو مشع radiation environments ، وقد أجريت دراسات عديدة للتعرف على سلوك الألياف اثناء وبعد التشعيع لشرح ميكانيكية الفقد المستحث بالإشعاع – Maurer et al., 1973 – وبإنتاج ألياف بصرية قليلة الفقد وبتركيبات جديدة لقشرة ولب الشعيرات أجريت دراسات على تأثير الإشعاع على الألياف من نوع Polymer-clad silica (PCS) (Friebele et al. 1978b) وكذلك الألياف المصنوعة من السيليكا المشابة والألياف البلاستيكية Friebele et al. (1978 a) Plastic fibres وأمكن دراسة النمو والاضمحلال الناتج من تأثير التشعيع بجرعات من ١ راد إلى ١٠^{٦} راد .

وتعمل نظم التراسل الضوئى – وخاصة التى تستخدم لمسافات أقل من ٢ كيلومتر – فى منطقة الأشعة تحت الحمراء القريبة near infra-red عند الطول الموجى ٨٥٠ نانومتر ، حيث يستخدم ثنائى باعث الضوء Light emitting diode (LED) وليزر الحقن injection laser ، ودرست معظم خصائص الألياف قليلة الفقد عند طول الموجة ٠,٨٢ ميكرومتر . لقد قام "Frieble" ومعاونوه (١٩٧٩) بدراسات عن سلوك الألياف البصرية وخصائصها حول الطول الموجى ١,٣ ميكرون . وقد أظهرت النتائج التى توصلوا إليها عند الطول الموجى ٠,٨٢ ميكرون ، أن الإتلاف الذى يحدث فى ألياف PCS يصل إلى التشبع بزيادة الجرعة فيصل الفقد المستحث عند التشعيع بجرعات صغيرة إلى أكثر من مائتى ضعف القيمة المتوقعة المحسوبة على أساس جرعات التشعيع الكبيرة عند استخدام أطوال قصيرة للألياف البصرية أو ألياف مصمتة . كما لوحظ :

١- أن ألياف PCS التى تحتوى على قدر ضئيل من مجموعة الهيدوكسيل OH تكون أكثر قابلية للإتلاف الناتج من التشعيع باستخدام أطوال موجية عند ٠,٨٢ ميكرون عن ألياف تحتوى على قدر كبير من OH .

٢- حدوث امتصاص انتقالى كبير فى ألياف السليكا المشابة لبها بالجيرمانيوم .

٣- أنه قد أظهرت القياسات الطيفية لطيف الامتصاص للألياف فى المدى الطيفى من ٠,٤ الى ١,٠ ميكرون أن الامتصاص المستحث نتيجة الإشعاع يقل عندما ننتقل فى اتجاه الأطوال الموجية الأطول .

ولقد أصبح التعرف على خصاص الإتلاف الناتج من التشعيع للألياف التى معامل فقدها ضئيل حول λ = ١,٣ ميكرون ، ضرورة أساسية لنظم التراسل الضوئى التى تستخدم أجهزة ليزر ينبعث عنها أشعة لها هذا الطول الموجى وذلك للانخفاض الملحوظ فى التفرق الضوئى حول هذه القيمة للطول الموجى أى تغير معامل انكسار مادة الألياف البصرية مع الطول الموجى وللتعرف على التفسير الفيزيائى لميكانيكية الإتلاف الناتج عن التشعيع المسئول عن الامتصاص المستحث نأخذ نوعين من الإتلاف :

أ- إتلاف للألياف بتعريضها لأشعة γ . تتفاعل أشعة γ أساسا مع الزجاج ، فيتم إكراه الألكترونات لتترك مواقعها المألوفة وتتحرك خلال شبكية الزجاج . ينتج عن ذلك أولا زيادة في معامل الامتصاص في منطقتي الأشعة فوق البنفسجية والمنظورة والأشعة تحت الحمراء القريبة . وفي عام (١٩٧٤) قام « سيجل وايفانز Sigel & Evans » بدراسة الإتلاف المستحث الناتج بالتشعيع بأشعة γ في الألياف وخلصا إلى ان الفقد المستحث يعتمد أساسا على تركيب الشعيرة ويتغير بين ١٠$^{-٤}$ ديسيبل لكل كيلومتر لكل راد لألياف مصمتة من ثاني أكسيد السيليكون bulk suprasil Sio_2 ، ٥ ديسيبل لكل كيلو متر لكل راد للألياف من زجاج Corning عند ٨٠٠٠ انجستروم . يعني هذا أن مادة السليكا النقية المصهورة شديدة المقاومة للإشعاع في حين أن زجاج Corning رقم ١٠٥٠ له قابلية محسوسة للتغير بالإشعاع .

ب- إتلاف الألياف بتعريضها للنيترونات . تتفاعل النيترونات في الأوساط الصلبة أساسا مع النواه - انظر Shah 1975 - لهذا فما يحدث نتيجة التعريض للنيوترونات ليس فقط زيادة في الفقد الناتج عن الامتصاص إنما يحدث أيضا تغيرات تركيبية ينتج عنها تغير في الكثافة وفي معامل الانكسار ، وقوة دوران rotary مستوى الاستقطاب للأشعة ، والانكسار المزدوج والموصلية الحرارية .

وفي عام (١٩٧٣) قام « موررير Maurer et al » ومعاونوه بتشعيع ألياف متعددة المنوال مصنوعة من زجاج السليكا بحزمة من النيوترونات ١٤ مليون ألكترون فولت مستخدمين جرعات كبيرة تصل الى ١,٤ × ١٠^{١٢} نيوترون لكل سم٢ . وقد أفادت النتائج بأن الفقد المستحث من التشعيع بالنيوترونات يتغير خطيا تقريبا مع الجرعة الكلية وأن قيمته تكون أقل من ١,٥ × ١٠$^{-١١}$ ديسيبل لكل كيلو متر لكل نيوترون لكل سم٢ في المدى من ٨٠٠٠ إلى ١٢٠٠٠ أنجستروم .

وللحصول على قياسات طيفية ثابتة Permanent وتعتبر كمرجع استخدم « فريبيل Friebele et al » ومعاونوه عام (١٩٧٩) أليافا بصرية طولها من ١٠-٣٠ مترا تم تشعيعها بمصدر كوبلت ٦٠ ينبعث منه ١٠^{٥} راد (سليكون) وقيس الامتصاص الضوئي في

المدى الطيفى من ٠,٤ إلى ١,٧ ميكرون قبل التشعيع وبعد انقضاء ساعة واحدة. كما تم تعريض شعيرة بصرية طولها متر واحد لمدة ٣ نانوثانية ، ٣٧٠٠ راد لحزمة من ٠,٥ مليون الكترون فولت الكترونات نبضية . وكانت الألياف التى استخدمها فريبل ومعاونوه من النوع متدرج معامل انكسار لبه ، كما حصلوا على نتائج مماثلة باستخدام ألياف بصرية ثابت معامل انكسار لبها . وقد دلت نتائج تجاربهم على أنه بالإضافة الى حدوث أشرطة امتصاص عريضة فى منطقتى الأشعة فوق البنفسجية وتحت الحمراء فقد سجلت زيادة فى الشدة فى شرائط الهيدروكسيل OH وشريط Combination عند ٠,٩٥ ، ١,٢٣ ، ١,٣ ميكرون.

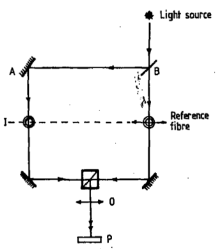
٢/٨- تأثير التشعيع بأشعة جاما على قيمة معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف البصرية والألياف النسجية التركيبية

The effect of γ irradiation on the refractive indices and birefringence of optical and synthetic textile Fibres :

طبق « برتولوتى Bertolotti et al, » ومعاونوه (a ١٩٨٠ ، ١٩٧٩) طريقة التداخل الضوئى الثنائى لدراسة التغيرات الصغيرة فى معاملات الانكسار للألياف البصرية بعد تعرضها لأشعة جاما . واستنتجوا أنه تطرأ تغيرات محسوسة على كل من معاملات الانكسار وأبعاد الألياف البصرية حتى باستخدام جرعات منخفضة نسبيا من أشعة جاما (راد واحد مثلا) . وزيادة على ذلك فإن هذه التأثيرات تختفى عند درجة الحرارة العادية خلال عدة أيام . وفيما يلى نشرح الطريقة التى استخدمها برتولوتى ومجموعته .

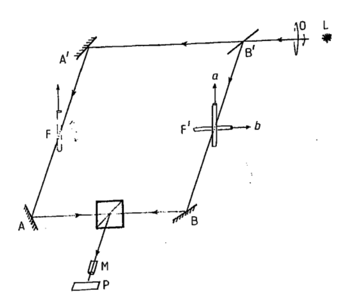
يبين الشكل رقم (١/٨) النظام البصرى لميكروسكوب التداخل الضوئى الثنائى لماخ وزندر Mach-Zehender interferometer الذى يسمح بتكوين هدب التداخل الضوئى الناتج من الشعاع الذى يعبر الشعيرة الموضوعة فى الذراع A لمقياس التداخل الضوئى وشعاع آخر مرجع يمر خلال الذراع B الذى يحتوى على عينة من شعيرة عيارية . ومقياس التداخل الضوئى الموضح فى الشكل رقم (١/٨) هو أحادى المسار . وتضبط صورة واضحة لهدب التداخل الضوئى على الفيلم الحساس P باستخدام المكون البصرى O . لقد

اسـتـخـدمـت هذه الطريقـة لتـعـيين التـغـيـرات التى تطرأ على مـعـامـلات انكسـار الألياف البصرية (STEP) للضـوء ، وكذلك التـغـيرات فى أبعاد هذه الألياف بعد تشـعيـعـها بجرعة إشـعـاعيـة مـقـدارها كيلو راد واحد من أشعـة جاما ناتجـة من مـصـدر كوبالت ٦٠ Co 60 . وسـجل برتولوتى ومجـمـوعتـه تغـيـرات نسـبيـة فى أنصـاف أقطار لب وقشـرة الشـعيـرات تصل قيمتـها ٣,٩ ، ١,٨٪ على الترتيب ، وتغيرات فى مـعاملات انكسار لب وقشرة الشعيرات بمقدار ٢,٨ ، ٢,٢٦٪ على الترتيب .



شكل رقم (١/٨) : نظام تداخل ضوئى ثنائى مستخدم لدراسة التغيرات الضئيلة فى معامل انكسار الألياف البصرية المشععة بإشعاع γ (من Bertolotti et al 1980 b)

كما قدم "Bertolotti et al" (a ١٩٨٠) وصـفـا لطريقـة مـفـيـدة وهى طريقـة التـداخل الضوئى بالطرح Subtraction interferometric method ، وذلك لتعيين التغيرات الصـغيرة التى تطرأ على مـعـامـلات انكسـار وأبعـاد الاليـاف البـصـرية ، ويوضح الشـكل رقم (٢/٨) النظام البـصـرى المسـتـخدم فى هـذه الطريقة . فتـوضـع شـعيرتان فى ذراعى مـقـيـاس مـاخ وزندر Mac-Zehender interferometer على أن يكون محـوراهـما متـوازيين فى الوضـع (a) متعامدين فى الوضـع (b) .



شكل رقم (٢/٨) : رسم تخطيطى للنظام البصرى لطريقة التداخل الضوئى بالطرح عند تطبيقها على الألياف البصرية . L مصدر ضوئى ، 'AA' ، BB مكونات مقياس التداخل الثنائى لماخ وزندر . M ميكروسكوب ، P لوح فوتوغرافى . توضع الشعيرتان فى ذراعى المقياس على أن يكون محوراهما متوازيين فى الوضع a ومتعامدين فى الوضع (b)

إزاحة هدب التداخل الضوئى عند تطبيق طريقة التداخل الضوئى بالطرح على الألياف

Expressions for the fringes shift in subtraction interferometry of fibres :

سندرس حالة التداخل الضوئى بالطرح بين عينتين من نفس الشعيرة ، أحدهما تعمل كمرجع والأخرى مشععة والمطلوب تعيين تأثير التشعيع على كل من أبعاد ومعاملات انكسار الشعيرة . توضع العينتان فى ذراعى مقياس التداخل الضوئى لماخ وزندر ، على أن يكون محوراهما متوازيين أو متعامدين ، كما فى الشكل رقم (٢/٨) وفى كلتا الحالتين فإن فرق طول المسار الضوئى (OPL) بين المرآتين 'AA والمرآتين 'BB تعطيه المعادلة :

$$\Delta = \int_{A}^{A'} n dx - \int_{B}^{B'} n dx$$

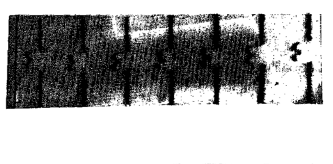
وباعتبار أن التغير فى معاملات الانكسار يكون صغيرا وأن الشعيرة عبارة عن جسم يغير من طور الأشعة phase object فإن Δ تظهر كإزاحة فى الهدبة .

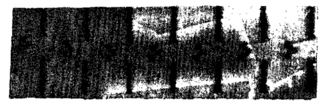
١/٢/٨- تأثير أشعة جاما على معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لألياف النسيج التركيبية

Effect of γ irradiation on the refractive indices and birefringence of textile synthetic fibres :

طبق "Hamza et al" (١٩٨٦) هدب فيزو للتداخل الضوئى لدراسة تأثير أشعة جاما على بعض الخواص الضوئية للألياف التركيبية . وأجريت عملية التشعيع فى الهواء . واستخدم "Hamza and Mabrouk" (١٩٨٨) هدب التداخل الضوئى المتعدد عند النفاذ وعند الانعكاس لتعيين معاملات الانكسار والانكسار المزدوج لألياف الدرالون Dralon المشععة بأشعة جاما . وأجرى التشعيع عند ضغط منخفض (١,٥ × ١٠$^{-٤}$ تور) ، حيث وضعت العينات فى أنبوبة اختبار تغلق بعد إجراء عملية التفريغ والوصول إلى قيمة هذا الضغط المنخفض . وعرضت لأشعة جاما من مصدر كوبلت ٦٠ Co 60 . وأجريت عملية التشعيع لأزمنة مختلفة من ٩٦ إلى ٥٧٣ ساعة ، وكان معدل الجرعة الإشعاعية هو ٢٣,٧١ ± ٠,٢٧ راد / ثانية . ويبين الشكل رقم (٨/٣/أ ، ب) هدب التداخل الضوئى المتعدد لفيزو عند الانعكاس عندما تعبر شعيرة من ألياف الدرالون المشععة بجرعة إشعاعية مقدارها ٢٢,٥٥٩ ميجاراد ، وذلك باستخدام ضوء أحادى طول الموجة (λ = ٥٤٦,١ نانومتر) (أ) مستقطبا فى المستوى العمودى على محور الشعيرة (ب) فى الاتجاه الموازى لمحور الشعيرة ، ويمكن حساب معامل الانكسار المتوسط للشعيرة من المعادلة :

$$n_a = n_L + \frac{F}{2A}\frac{\lambda}{h}$$





شكل رقم (٣/٨) : هدب التداخل المتعدد لفيزو عند الانعكاس عبر ألياف درالون بعد تشعيعها بأشعة γ بجرعة ٢٢,٥٥٩ ميجاراد عندما تكون الأشعة وحيدة الطول الموجى مستقطبة فى مستوى وتتذبذب موازية (a) وعمودية (b) على محور الشعيرة (من Hamza and Mabrouk)

كما هو موضح فى الفصل السادس - حيث A هى مساحة مقطع الشعيرة ، h هى المسافة بين كل هدبتين متتاليتين فى منطقة سائل الغمر ، F هى المساحة المحصورة تحت إزاحة الهدبة عندما تعبر الشعيرة .

ويمكن ملاحظة أن هذه المساحة أكبر فى الصورة (٨/٤/ب) عنها فى الصورة (٨/٤/أ) ، يدل ذلك على أن قيمة $n_a^{\perp}$ أكبر من قيمة $n_a^{\parallel}$ عند نفس الجرعة الإشعاعية . والقيم المقاسة لهذا النوع من الألياف بعد تشعيعها هى :

$$n_a^{\parallel} = 1.5178, n_a^{\perp} = 1.5202 \text{ and } \Delta n_a = -2.4 \times 10^{-3}$$

ويبين الشكل رقم (٨/٤/أ، ب) هدب فيزو للتداخل الضوئى عند النفاذ حيث تعبر شعيرة من ألياف الدرالون مشععة بأشعة جاما وبجرعة إشعاعية مقدارها ٤٩,١٤٧ ميجاراد ، وذلك باستخدام ضوء أحادى طول الموجة (λ = ٥٤٦,١ نانومتر) مستقطبا فى المستوى العمودى على محور الشعيرة وفى الاتجاه العمودى عليه على الترتيب . ويمكن من الشكلين

(٣/٨) ، (٤/٨) ملاحظة أن المساحة F المحصورة تحت إزاحة الهدبة عندما تعبر الشعيرة تزيد بزيادة الجرعة الإشعاعية .

واقترح "Hamza and Mabrouk" صيغ وضعية empirical formulae للعلاقة بين معامل الانكسار والجرعة الإشعاعية (r) وكذلك للعلاقة بين معامل الانكسار المزدوج والجرعة الإشعاعية وذلك فى المدى من صفر إلى ٤٩,١٤٧ ميجاراد كالآتى :

$$n_a = n_o \exp (ar^{1/3})$$

حيث :

$$n_o^{\parallel} = 1.5122 \quad \text{and} \quad a = 1.344 \times 10^{-5}\ \text{rad}^{-1/3} \text{ for } n_a^{\parallel} \text{ and}$$

$$n_o^{\perp} = 1.5164 \text{ and } a = 9.08 \times 10^{-6}\ \text{rad}^{-1/3} \text{ for } n_a^{\perp}$$

وبالنسبة لمعامل الانكسار المزدوج اقترحت المعادلة :

$$\Delta n_a = \Delta n_o \exp (-ar^{1/2})$$

حيث :

$$\Delta n_o = -4.2 \times 10^{-3} \text{ and } a = 1.285 \times 10^{-4}\ \text{rad}^{-1/2}$$

وفى حالة ألياف الدرالون المشععة بأشعة جاما فى الهواء طبقت نفس المعادلات ولكن باستخدام القيم الآتية :

$$n_o^{\parallel} = 1.5120 \text{ and } a = 2.03 \times 10^{-5}\ \text{rad}^{-1/3} \text{ for } n_a^{\parallel}, \text{ and}$$

$$n_o^{\perp} = 1.5162 \text{ and } a = 1.62 \times 10^{-5}\ \text{rad}^{-1/3} \text{ for } n_a^{\perp}$$



شكل رقم (٤/٨) : هدب التداخل المتعدد لفيزو عند النفاذ عبر شعيرة من ألياف الدرالون بعد تشعيعها بأشعة γ بجرعة ١٤٧ , ٤٩ ميجاراد عندما تكون الأشعة المستخدمة وحيدة الطول الموجى مستقطبة فى مستوى وتتذبذب موازية (a) وعمودية (b) على محور الشعيرة (من Hamza and Mabrouk, 1988)

وطبق "Barakat et al" (١٩٨٩) هدب التداخل الضوئى لفيزو عند النفاذ لتعيين معاملات الانكسار($n_f^{\parallel}$, $n_f^{\perp}$) والانكسار المزدوج لألياف الكاشميلون Cashmilone المشععة بأشعة جاما . فعند استخدام ضوء أحادى طول الموجة (λ = ٥٤٦,١ نانومتر) وجدت القيمة الآتية قبل التشعيع :

$$n_f^{\parallel} = 1.5118, n_f^{\perp} = 1.5145 \text{ and } \Delta n_f = -0.0026$$

واستنتجوا أن الانكسار المزدوج يقل بزيادة الجرعة الإشعاعية r ، وأن المنحنيين بين r, $n_f^{\parallel}$ وبين r, $n_f^{\perp}$ يلتقيان عند جرعة إشعاعية مقدارها ١٨٥ ميجاراد . يدل ذلك على أن سلوك الألياف المشععة بتلك الجرعة يقارب سلوك الألياف متماثلة الخواص الضوئية isotropic ، وبزيادة الجرعة الإشعاعية يبعد المنحنيان عن بعضهما ولكن بإشارة مختلفة لقيمة الانكسار المزدوج ، وتكون $n_f^{\parallel}$ اكبر من $n_f^{\perp}$.

References

Barakat N, El-Hennawi H A, El-Okr M and Sharaf F 1989 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **22** 786

Bertolotti M, Ferrari A and Scudieri F 1979 *Radiat. Eff. Lett.* **43** 177

——— 1980a *Opt. Acta* **27** 1143

Bertolotti M, Ferrari A, Scudiri F and Serra A 1980b *Appl. Opt.* **19** 1501

Friebele E J, Gingerich M E and Sigel Jr G H 1978a *Appl. Lett.* **32** 619

Friebele E J, Sigel Jr G H and Gingerich M E 1979 *Fibre optics* ed. B Bendow and S Mitra (London : Plenum) p355

Friebele E J, Sigel Jr G H, Jaeger R E and Gingerich M E 1978b *Appl. Phys. Lett.* **32** 95

Hamza A A, Ghander A M, Oraby A H, Mabrouk M A and Guthrie J T 1986 *J. Phys. D Appl. Phys.* **19** 2443

Hamza A A and Mabrouk M A 1988 *Radiat. Phys. Chem.* **32** 654

Maurer R D, Schiel E J, Kronenberg S and Lux R A 1973 *Appl. Opt.* **12** 2023

Shah J 1975 *Bell Syst. Tech. J* **54** 1208

Sigel Jr G H and Evans B D 1974 *Appl. Phys. Lett.* **24** 410

الفصل التاسع

ميكروسكوبات التداخل الضوئى

Interference Microscopes

ميكوسكوبات التداخل الضوئى هى ميكروسكوبات معدله يمكن بواسطتها رؤية الجسم (المعتم أو الشفاف) وفى نفس الوقت تحتوى على مقياس تداخل ضوئى,Tolansky) (1973 . ويعنى هذا أن ميكروسكوب التداخل الضوئى يحتوى على الميكروسكوب الضوئى ومقياس التداخل فى جهاز واحد يعمل عمل كل منهما . ويسمح هذا التعديل بالحصول على معلومات مفيدة بالإضافة إلى مايتم الحصول عليه باستخدام الميكروسكوب الضوئى التقليدى . ويوجد عدد من مقاييس التداخل الضوئى Optical interferometers التى يمكن أن تلحق بالميكروسكوب الضوئى ويتوفر عدد من هذه الميكروسكوبات على المستوى التجارى .

٩/١- أساسيات ميكروسكوب التداخل الضوئى

Fundamentals of interference microscopy

تنقسم الأجسام بالنسبة للميكروسكوب الضوئى إلى أجسام تحدث تغيرا فى سعة الموجة amplitude objects ، وأجسام تحدث تغيرا فى طور الموجة phase objects . وفى الحالة الأولى يختلف امتصاص الأجسام للضوء عن امتصاص الوسط المحيط بالجسم لهذا الضوء ، وبذلك يظهر تباين بين الجسم والوسط المحيط به تسجله عين الإنسان وأفلام التصوير لحساسيتهما للتغير فى الشدة الضوئية . والأجسام التى تغير من طور الموجةphase objects لها أهمية خاصة فى حالة ميكروسكوبات التداخل الضوئى ، ولاتعطى هذه الاجسام تغيرا فى شدة الضوء الممتص إنما تحدث اختلافا عن الوسط المحيط بها لاختلاف معاملات الانكسار أو السمك الضوئى (nt) ، حيث n هى معامل انكسار الجسم ، t هى سمكه بوحدة الأطوال . ويوضع الجسم الذى يغير من طور الموجة فى مقياس التداخل الضوئى فيغير من طول المسار الضوئى خلال هذا الجسم . ويبين الشكل رقم (٩/١) فكرة ميكروسكوب التداخل الضوئى الثنائى – Françon 1961 .

وينقسم الشعاع الضوئى SM إلى شعاعين MON, MBN عند النقطة M بأحد عناصر مقياس التداخل الضوئى . ويمر الشعاع MON خلال الجسم 0 (phase object) . ويمكن أن يكون هذا الجسم عبارة عن شعيرة . ولا يمر الشعاع MBN بالجسم O ويلتقى الشعاعان مرة أخرى عند النقطة N بواسطة العنصر الآخر من عناصر مقياس التداخل الضوئى وتمر الأشعة بالميكروسكوب وتنتج هدب التداخل الضوئى . وتحدد نتيجة التداخل الضوئى بين الشعاعين MBN, MON شدة الشعاع NS وتعتمد على معامل الانكسار وسمك الجسم O .

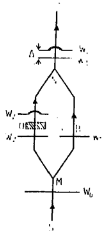
وفرق الطور δ بين الموجتين W_2, W_1 يساوى $\frac{2\pi}{\lambda}\Delta$ ، حيث Δ هى فرق المسار، ويحكم هذا باستخدام مقياس التداخل الضوئى . والعلاقة الآتية تعطى توزيع الشدة الضوئية فى الهدب الناتجة بدلالة فرق الطور δ :

$$I = I_o \cos^2 \delta / 2$$
$$= I_o \cos^2 \frac{\pi}{\lambda} \Delta$$

فعندما تكون Δ تساوى صفرا فإن δ تساوى صفرا ويكون $I = I_o$.

ويتضح أن الموجتين يكون لهما نفس الطور فى جميع المناطق ماعدا المناطق التى حدث لها تغير بواسطة الجسم phase object . وفى حالة هدب التداخل الضوئى الثنائى تتبع توزيع الشدة الضوئية قانون مربع جيب التمام Cos^2 law . وتكون عرض الهدبة المضيئة مساويا لعرض الهدبة المعتمة وتساوى نصف المسافة بين هدبتين مضيئتين متتاليتين . وعندما يتغير طور الموجة δ خلال الأجزاء التى حدث لها تغير بواسطة الجسم تتغير الشدة الضوئية الناتجة ، وتعطى معلومات عن قيمة ومدى تغير السمك الضوئى optical thickness للجسم مغير الطور phasor وإذا كانت قيمة Δ صغيرة تكون رتبة التداخل N صغيرة وتساوى صفرا أو ١ أو ٢ ، وتظهر هدب تداخل ضوئى ملونة عندما يضاء مقياس التداخل الضوئى بمصدر ضوئى أبيض .

نذكر هنا أنه قد تم فى الفصل السادس شرح أساسيات هدب التداخل الضوئى المتعدد وتطبيقها على الألياف .



شكل رقم (١/٩) : أساس ميكروسكوب التداخل الضوئى الثنائى وتظهر جبهات الموجات الناتجة

وتنقسم أنواع ميكروسكوبات التداخل الضوئى إلى مجموعتين :

أ- المجموعة التى تستخدم الضوء المنعكس أى التى تتعامل مع أجسام معتمة غير منفذة للضوء مثل المعادن .

ب- المجموعة التى تستخدم الضوء النافذ خلال الأجسام ، أى التى تتعامل مع الأجسام الشفافة التى تسمح بنفاذ ضوء من خلالها مثل الألياف والمواد البيولوجية biological materials .

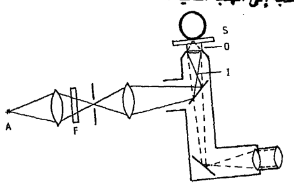
وتعطى المجموعة (أ) معلومات عن تضاريس سطح الأجسام ، بينما تعطى المجموعة (ب) معلومات عن تركيب العينات sample structure وعن قيمة $n_{\lambda}t$ عند أى نقطة على العينة . وإذا قيس سمك العينة (بالمليمتر مثلا) فإنه يمكن تعيين معامل الانكسار . ولميكروسكوب التداخل الضوئى قوة تكبير عالية high magnification يصاحبها قوة تحليل كبيرة high resolution فقط فى حالة البعد الرأسى أى العمق (Tolansky 1973) .

والشكلان الآتيان يعطيان وصفا لميكروسكوبين كمثالين للنظام البصرى المستخدم فى المجموعتين أ ، ب .

١- ميكروسكوب التداخل الضوئى بالأشعة المنعكسة

Interference microscopes using reflected light :

طور « تولانسكى Tolansky, » (١٩٤٤) نظاما مبسطا فى حالتى التداخل الضوئى الثنائى والمتعدد – انظر : Tolansky, 1973 – ونلاحظ فى الشكل رقم (٢/٩) أن الضوء يخرج من المصدر A ليمر من خلال المرشح الضوئى F وتتكون صورة I فى المستوى البؤرى للعدسة الشيئية O . وتمثل S نظام التداخل الضوئى الذى يتكون من الجسم موضوعا على مسطح ضوئى . ويضاء هذا النظام بسقوط حزمة متوازية من الضوء أحادى اللون عموديا عليه . ويظهر سطح الجسم مغطى بهدب التداخل الضوئى ، ويمكن الحصول على خريطة هذه الهدب بارتفاعات تتغير بمقدار $\lambda/2$ (حيث λ هى طول موجة الضوء المستخدم) عندما ننتقل من هدبة إلى الهدبة التالية .



شكل رقم (٢/٩) : ميكروسكوب التداخل الضوئى الذى يستخدم أشعة منعكسة (من Tolansky 1973)

٢- ميكروسكوب التداخل الضوئى الذى يستخدم الأشعة النافذة

Interference microscopes using transmitted light

تفحص الأجسام الشفافة المنفذة للضوء مثل الألياف التركيبية والألياف البصرية بواسطة الأشعة النافذة . ويوجد عدد كبير من ميكروسكوبات التداخل الضوئى التى تستعمل الضوء النافذ ، وقد قسم « تولانسكى Tolansky » (١٩٧٣) هذه الأجهزة إلى :

أ- أجهزة تستخدم ميكروسكوبين .

ب- أجهزة تستخدم ميكروسكوب مطور modified microscope .

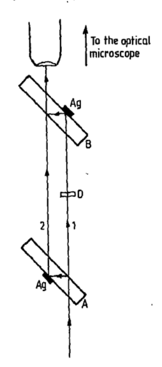
جـ- العدسة الشيئية المحتوية على مقياس تداخل ضوئى interference objectives .

د- مقاييس التداخل الضوئى التفاضلية differential interferometers .

وقد أعطى تولانسكى وصفا لبعض الأجهزة الممثلة لهذه الأنواع الأربعة من ميكروسكوبات التداخل الضوئى .

ووصف " Sirks " فى عام (١٨٩٣) واحدا من أوائل ميكروسكوبات التداخل الضوئى التى تستخدم الأشعة النافذة . ويتكون هذا الميكروسكوب من مقياس التداخل الضوئى لجامن Jamin interferometer الذى يوضع قبل الميكروسكوب الضوئى - انظر Tolansky, 1973 : - ويبين الشكل رقم (٣/٩) رسما توضيحيا لهذا الجهاز حيث B, A عبارة عن لوحين متماثلين من الزجاج يحتوى كل منهما على منطقة صغيرة مفضضة .

وتنقسم الحزمة الضوئية المتوازية إلى شعاعين ١ ، ٢ كما فى الشكل رقم (٣/٩) ، ويمر أحدهما خلال الجسم O بينما يمر الشعاع الآخر بالقرب من هذا الجسم . وينتج عن ذلك وجود فرق فى المسار الضوئى . وبالمرور خلال B يتداخل الشعاعان وينتج هدب تداخل ضوئى يمكن رؤيتها بالميكروسكوب ، وتعطى هذه الهدب معلومات عن الجسم O .



شكل رقم (٣/٩) : ميكروسكوب التداخل الضوئى لجامان (تولانسكى ١٩٧٣)

وللحصول على معلومات أكثر عن أساسيات ميكروسكوبات التداخل الضوئى وتطبيقاتها فى بحوث الألياف نقترح الرجوع إلى المراجع الآتية :

Tolansky (1948, 1973), Françon (1961), Heyn (1954, 1957), Barer (1955), Stoves (1957), Pluta (1971, 1972, 1982), Fatou (1978), Steel (1986) and Hamza (1986).

ونذكر فى القسم التالى وصفا لبعض ميكروسكوبات التداخل الضوئى الثنائى ، وكذلك بعض الأنظمة البصرية التى تستخدم في مجال دراسة الألياف بالتداخل الضوئى fibre interferometry .

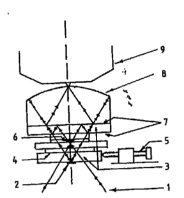
٢/٩- بعض أنواع ميكروسكوبات التداخل الضوئى :

Some types interference microscope

١/٢/٩- ميكروسكوب التداخل الضوئى لدايسون

The Dyson interference Microscope :

فى هذا الميكروسكوب – Dyson 1950, 1953 – يسقط الضوء بواسطة عدسة مجمعة حيث يتم اعتراضه بشريحة ذات سطحين متوازيين ، سطحها العلوى مغطى بطبقة رقيقة من الفضة ينفذ من خلالها الضوء ليسقط جزء منه على الجسم وينعكس جزء آخر مرتين لوجود منطقة مغطاة بالفضة (2) ، وبذلك يمر شعاعان بالمستوى الموجود به الجسم ، أحدهما من خلاله والآخر لايمر بالجسم ويعتبر كمرجع . ويبين الشكل رقم (٤/٩) النظام البصرى لميكروسكوب التداخل الضوئى لدايسون – Dyson, 1950 .



شكل رقم (٩/٤) : النظام البصرى لميكروسكوب التداخل الضوئى لدايسون (من Dyson 1950)
1- مخروط حزمة الأشعة الضوئية الساقطة على الجسم (6) بواسطة العدسة المجمعة
2- منطقة مغطاة بطبقة من الفضة تعكس الضوء 3- شريحة من الزجاج سطحاها متوازيان
4- سطح نصف مفضض 5- مسمار محوى يقوم بتحريك الشريحة (3) 6 - الجسم تحت الفحص
7- سطح نصف مفضض 8- سطح مغطى بطبقة سميكة من الفضة 9- شيئية الميكروسكوب

٩/٢/٢- ميكروسكوب التداخل الضوئى لبيكر :

Baker interference microscope

تم تطوير هذا الميكروسكوب عام (١٩٥٠) وهو ميكروسكوب تداخل ضوئى يقوم على الانكسار المزدوج . وقد ناقش " Heyn " (١٩٥٧) استخدامه فى دراسة الألياف النسجية . وفيه ينفصل الشعاع الضوئى إلى شعاعين : الشعاع المعتاد ordinary ray ، والشعاع الشاذ extra ordinary . وذلك باستخدام مجزئ حزمة الأشعة beam splitter ، مكون من بلورة تحدث انكسارا مزدوجا ، ويكون الشعاعان مستقطبين فى مستويين متعامدين . ويمر هذان الشعاعان فى الأجزاء المختلفة من الجسم . ويمكن قياس معامل انكسار الألياف بسهولة باستخدام هذا الميكروسكوب .

٩/٢/٣- ميكروسكوب التداخل الضوئى « انترفاكو »

The " Interphako " interference microscope

يعتبر هذا الجهاز مناسبا لقياس الفروق الصغيرة فى المسار الضوئى فى العينات الميكروسكوبية ، ويمكن استخدام عدة طرق تقوم على التداخل الضوئى لدراسة وقياس

الخواص الضوئية للعينات بهذا الجهاز . ففى حالة استخدامه بطريقة الأشعة النافذة (*) يتكون الانترفاكو من :

أ- ميكروسكوب ضوئى عادى يستخدم الأشعة النافذة خلال الجسم المراد فحصه .

ب- نظام داخلى وسيط لتكوين الصورة .

جـ- مقياس ماخ وزندر للتداخل الضوئى .

ويبين الشكل رقم (٩/٥) مسار الأشعة فى ميكروسكوب الانترفاكو -Beyer and Schöppe, 1965 - حيث تضاء الفتحة Sp بالمصدر الضوئى S . وبمساعدة العدسة المجمعة (1) والعدسة الشيئية (2) تتكون صورة للفتحة Sp فى المستوى البؤرى للعدسة الشيئية عند $S_{p'}$. ويكون النظام الداخلى لتكوين الصورة (3,4,5) صورة مرحلية intermediate للجسم O عند O', O" كما يكون صورة لفتحة الخروج للميكروسكوب exit pupil عند $S_{p''}$ فى مقياس التداخل الضوئى . ويستخدم المنشور (4) لوضع صورة لفتحة (exit pupil) $S_{p''}$ فى مكانها الصحيح . ويستخدم المنشور (12) فى عملية التصوير . أما العدسة (13) وهى من نوع معين Bertrand lens فتستخدم فى رؤية الفتحة .

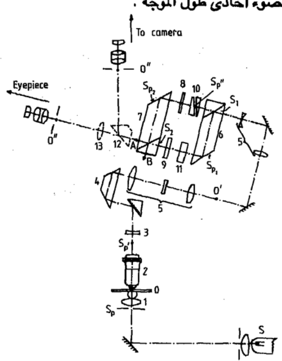
ويتكون مقياس التداخل الضوئى فى هذا الجهاز من منشورين (7 & 6) ، ومغير لطور الأشعة(8) Phase shifter ، وإسفين ضوئى دوار (10) rotary wedge بالإضافة إلى عنصرين (٩) ، (١١) يتم عن طريقهما تعادل الأشعة compensating elements .

ويخرج الشعاعان المتكونان عند سطح مجزئ الشعاع S_1 من فتحتى الخروج exits ، والنقطتان B,A من المنشور (7) يقابلان بعضهما تماما من ناحية الارتفاع والاتجاه . ويحدث مغير الطور (8) phase shifter فرقا فى المسار بين $S_1 S_{p1} S_2, S_1 S_{p2}$ بالمقدار $\pm 15\lambda$ (حيث λ هى طول موجة الضوء وتساوى ٥٠٠ نانومتر) وذلك كحد أعلى . ويمكن قياس فرق المسار حتى ثلاثين رتبة . ويتكون الإسفين الضوئى

(*) See Description and Instruction Manual, Carl Zeiss Jena, Brochure No 30-G305-2.

الدوار (10) rotary wedge من إسفينين من الزجاج المتماثلين فى الشكل والتصميم ويدوران حول المحور البصرى فى اتجاهين متضادين ويمكن استخدام الانترفاكو فى قياس الأجسام المناسبة بدقة تصل الى $\lambda/200$ بدون استخدام شريحة نصف مظللة half-shade plate ، وتصل هذه الدقة إلى $\lambda/500$ باستخدام هذه الشريحة .

واستخدم "Hamza, 1986 and Hamza et al 1986" جهاز الانترفاكو لقياس معاملات الانكسار المتوسطة والانكسار المزدوج لألياف البولى استر والياف المركب المزدوج المتكون من غلاف sheath من النايلون ٦ ولب core من النايلون ٦٦ . وتم استخدام كل من الضوء الأبيض والضوء أحادى طول الموجة .



شكل رقم (٥/٩) : مسار الأشعة فى ميكروسكوب التداخل الانترفاكو (من Description and Instructions Manual Carl Ziess Jena, Brochure No 30-G305-2) S مصدر ضوئى Sp فتحة ، O الجسم ، (1) عدسة مجمعة (2) شيئية (3), (4), (5) نظام تكوين الصورة المرحلية (6), (7) ، منشوران ، (8) مغير طور الأشعة (9), (11) عنصران يتم عن طريقهما تعادل الأشعة (10) الإسفين الدوار (12) منشور (13) عدسة برتراند

٤/٢/٩- ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا

The Pluta polarising inerference microscope

طور « بلوتا Pluta » (١٩٦٥ ، ١٩٧١ ، ١٩٧٢) ميكروسكوب تداخل ضوئى مستخدما الانكسار المزدوج ، ويتميز بكمية واتجاه متغيرين من الـ wavefront shear ووصف استخدام هذا الميكروسكوب لدراسة الألياف التركيبية . وقدم بلوتا بعض التحسينات فى قياس معاملات الانكسار والانكسار المزدوج للألياف باستخدام التداخل الضوئى . ويوفر هذا الميكروسكوب مجالين :

أ- مجالا متجانسا للرؤية uniform field .

ب- مجالا يحتوى على هدب التداخل الضوئى fringe interference field مع ازدواج جانبى للصورة ، ويستخدم لكل من التحليل الكيفى باستخدام طريقة التباين التفاضلى لهدب التداخل differential interference contrast (DIC) والتحليل الكمى ، وذلك بقياس فرق المسار الضوئى للعينات المختلفة المنفذة للضوء .

ولميكروسكوب التداخل الضوئى التقليدى استخدامات محدودة فى مجال دراسة الألياف . بينما تتميز ميكروسكوبات التباين التفاضلى لهدب التداخل Nomarski (1955) DIC بميزات كثيرة فى هذا المجال . وسنشرح فيما يلى الفكرة التى بنى عليها ميكروسكوب بلوتا.

ويبين الشكل رقم (٦/٩) المسار الضوئى لميكروسكوب التداخل الضوئى بالانكسار المتغير variable double-refracting interference (VDRI) الذى طوره « بلوتا Pluta » (١٩٧١ ، ١٩٧٢) تمثل Z المصدر الضوئى Kol مجمع الضوء illuminator collector D_p, فتحة diaphragm . ومن أهم الصفات المميزة لهذا النظام البصرى احتواؤه على منشورين للانكسار المزدوج birefringent prisms W_1 & W_2 يعملان فى نفس الوقت ويفصل بينهما لوح نصف موجى half wave plate (H) ، وهذان المنشوران هما من نوع منشورات والاستون Wollaston prisms – انظر Nomarski, 1955 – والمصنوعة من بلورة الكوارتز .

ويتضح من الرسم أن المنشور W_1 موضوع خلف العدسة الشيئية ob وعند مسافة ثابتة منها i_1 ، ويمكن لهذا المنشور أن يدور حول محور هذه العدسة لإمكان تغير المسافة بين الصورتين ، ويوضع المنشور W_2 فى أنبوبة الميكروسكوب عند مسافة متغيرة i_2 ويمكن أن يزاح إلى وضعين ، مواز (أ) وعمودى (t) على محور العدسة الشيئية . ولكل من هذين المنشورين مستوى خارجى لهدب التداخل الضوئى الخاصة به ، وتضم هذه الهدب لتتطابق مع البؤرة الخلفية 'F للعدسة الشيئية . وتوضع فتحة مستطيلة D فى المستوى البؤرى الأمامى للعدسة المجمعة للضوء C . ويوجد مستقطب polariser P قبل هذه الفتحة ومحلل analyser A خلف المنشور W_2 ، وتدور الفتحة D واللوح النصف موجى H والمستقطب P حول محور العدسة الشيئية .

ويبين الشكل رقم (٧/٩) الوضع الابتدائى للمكونات P, A, H & S بالنسبة لوضع المنشورين W_2, W_1 وتبين E_2, E_1 حافتى الإسفينين a_2, a_1 زوايا هذين الإسفينين العلويين المقابلة لهاتين الحافتين واللتان تخصان المنشورين W_2, W_1 وتمثل F F أحد الاتجاهات الرئيسية لذبذبات الضوء light vibrations للوح النصف موجى SS, H هو اتجاه الفتحة

وفى ميكروسكوب التداخل الضوئى المستخدم الانكسار المزدوج المتغير VDRI تترك الموجة – المستقطبة استوائيا بالمستقطب P – العدسة المجمعة للضوء C وتتشكل نتيجة مرورها بالجسم الشفاف O . وتحدث إزاحة فى الطور phase shift نتيجة لفرق المسار الضوئى الذى حدث لنفاذها من خلال هذا الجسم . وتمر جبهة هذه الموجة من العدسة الشيئية ob وتنقسم بالمنشورين W_2, W_1 إلى جبهتين مستقطبتين فى اتجاهين متعامدين . وعند مرورهما خلال المحلل analyser A تتداخل الموجتان مع بعضهما وتكونا صورتين للجسم O بجانب بعضهما laterally duplicated ، وتتغير الإزاحة العرضية بدوران المنشور W_1 ، وتمثل π, π' مستوى الجسم والصورة على الترتيب ، oc عدسة عينية . و W_3 عبارة عن منشور ولاستون بزاوية إسفين مقدارها a_3 ، ويمكن أن يحل محل المنشور W_2 .

وقد قدم "Pluta" (١٩٧٢) أشكالا للمتجهات vectorial diagrams ، وذلك لتوضيح جبهة الموجة المحصلة فى الحالات المختلفة لترتيب وضع المنشور W_1 بالنسبة لوضع المنشور W_2 ، وتصل دقة قياس فرق طول المسار الضوئى بطريقة مجال الهدب fringe field – باستخدام منشور ولاستون – إلي 0.05λ ، حيث λ هى طول موجة الضوء المستخدم ، وبذلك يكون الخطأ فى تعيين معاملات الانكسار والانكسار المزدوج بهذه الطريقة أقل من ٠,٠٠٣ – ٠,٠٠١ ، ودقة قياس قطر الشعيرة هى حوالى ١ ميكرومتر – Pluta, 1972 .

ويمكن استخدام الضوء أحادى طول الموجة (λ = ٥٤٦ نانومتر) أو الضوء الأبيض ، ويستخدم الأخير لتحديد مكان الهدبة الصفرية(Faust and Marrinan, 1955) achromatic fringe . ويمكن استخدام طريقة التداخل التفاضلى-differential interfer ence وطريقة مجال الهدب fringe field method مع ميكروسكوب بلوتا ، وتعتبر الطريقتان مناسبتين لتعيين الانكسار المزدوج للألياف والشرائح الرقيقة ، وخصوصا العينات ذات التركيب غير المتجانس ويقدم ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا طريقة سهلة وسريعة لقياس معاملات الانكسار المزدوج للألياف غير المتجانسة التركيب والتى لها مقاطع عرضية منتظمة وغير منتظمة . ولهذا الجهاز فائدة كبيرة عند دراسة الألياف التى لها معاملات انكسار عالية جدا أو عند استخدام سائل غمر معامل انكساره يختلف عن معامل انكسار الشعيرة بمقدار كبير - Hamza and Sikorski, 1978 .

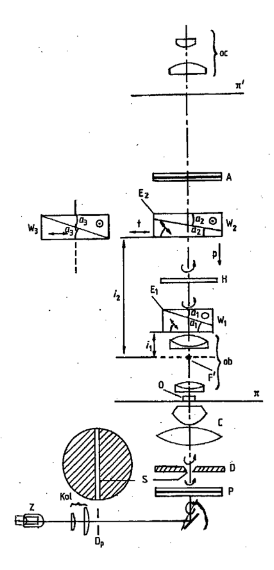
هذا وقد ناقش "Pluta" (١٩٧٢) مميزات هذا الجهاز من حيث استخدامه فى مجال بحوث الألياف . وأجرى حمزة ومجموعته دراسة مكثفة على الألياف الطبيعية والتركيبية باستخدام هذا الميكروسكوب – انظر : Hamza, 1986 والبحوث المذكورة فى هذا البحث .

٥/٢/٩- ازدواج الصورة فى ميكروسكوب التداخل الضوئى

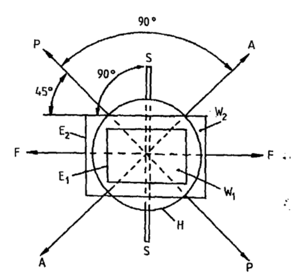
The shearing effect in interference microscopy :

تعتمد طريقة ازدواج الصورة على الانقسام الجانبى للصور ، وعندما يكون الانقسام أكبر من الجسم ينتج انقسام كلى للصورة total image splitting . وعندما يكون للانقسام الجانبى للصورة قيمة فى حدود قريبة من أقل قيمة تحدث انقسام ومن ثم انفصال ، يسمى بالانقسام التفاضلى differential splitting

وعند استخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى « انترفاكو » يمكن الحصول على الانقسام الكلى والانقسام التفاضلى وذلك باستخدام إسفين ضوئى دوار rotary wedge . يتكون هذا الإسفين الدوار من إسفينين من الزجاج لهما نفس التصميم design يمكن دورانهما حول المحور البصري فى اتجاهين متضادين بالنسبة لبعضهما .



شكل رقم (٦/٩) النظام البصرى لميكروسكوب التداخل المستخدم الانكسار المزدوج لبلوتا وفيه يوفر إمكانية التغيير المستمر لكمية واتجاه جبهة الموجة wavefront shear (من Pluta 1972)



شكل رقم (٩/٧) : الاتجاهات الابتدائية للعناصر الرئيسية التى يقوم عليها الميكروسكوب الموضح فى شكل (٩/٦) (من Pluta 1972)

وعند استخدام ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا يمكن الحصول على ازدواج فى الصورة ، وذلك باستعمال عدسات شيئية لها قوة انقسام عالية (من نوع Polarising inter-ference objectives) . ويكون منشور ولاستون W_2 الموجود فى رأس الميكروسكوب والمنشور W_1 الموجود في شيئية الميكروسكوب مع المستقطب والمحلل المتعامدين أو المتوازيين والفتحة slit تكون فى مجموعها نوعا من مقياس التداخل الضوئى ثنائى الاستقطاب Polskie Zaktady opťyczne (PZO) 1976- double polarising inter-ferometer – ويمكن أن يدور منشور ولاستون الموجود فى الشيئية حول محور رأسى لضبط مقدار انفصال الصور . ويعطى الحد الأقصى لهذا الانقسام (r) عندما تكون زاوية الدوران للمنشورين لها نفس الاتجاه same orientation وفى هذه الحالة تكون :

$$r = r_1 + r_2$$

حيث r_1 ، r_2 هما مقدارا الانقسام الذى يمكن الحصول عليه بواسطة المنشور الأول والثانى على الترتيب .

وإذا عكس المنشور الثانى بحيث تكون زاوية دورانه عكس اتجاه المنشور الأول فإن :

$$r = r_1 - r_2$$

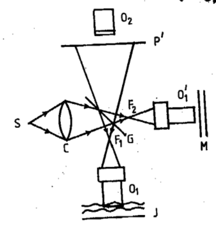
وينتج عن دوران المنشور الثانى الموجود فى شيئية الميكروسكوب حول محور رأسى قيمة انقسام الصورة image shearing value تتراوح بين $(r_1 + r_2)$ الى $(r_1 - r_2)$.

٦/٢/٩- ميكروسكوب التداخل الضوئى زايس لنيك

The Ziess-Linnik interference microscope

يقدم هذا الجهاز تطبيقا هاما لمقياس ميكلسون للتداخل الضوئى وذلك لدراسة تضاريس الأسطح ، وهو يعتبر جهاز حديث نسبيا وقد صممه وبناه "Linnik" (١٩٣٣) . ويبين الشكل رقم (٨/٩) تركيب هذا الجهاز حيث S مصدر الضوء ، C عدسة مجمعة ، G مجزئ لحزمة الأشعة ، ويميل بزاوية مقدارها ٤٥° على المحور الأفقى . وينعكس جزء من الضوء فى اتجاه العدسة الشيئية O_1 لتسقط على السطح المراد فحصه ، وتنعكس الأشعة من هذا السطح حاملة المعلومات عنه فى اتجاه العدسة العينية O_2 خلال مجزئ حزمة الأشعة G ، وينفذ الضوء خلال G إلى الشيئية O_1' المماثلة للعدسة O_1 ، ثم تنعكس هذه الأشعـــة على المرآة المستـــوية M لكى تصل إلى O_1 ، ثم تنعكس إلى G لكى تصل إلى العدسة العينية O_2 .

وتتكون الصورتان F_2, F_1 للمصدر S عند بؤرة كل من الشيئيتين O_1 , O_1' وتتداخل الموجتان ، الأولى هى الموجه المعدلة التى تحمل معلومات عن سطح الجسم J والثانية هى الموجة المستوية المرجع reference plane wave ويتم ذلك عند 'P التى يمكن ملاحظتها بالعينية O_2 . وتتكون خريطة لهدب التداخل الضوئى الثنائى . ويتم دراسة تضاريس سطح الجسم من شكل الهدب وقيم إزاحتها .



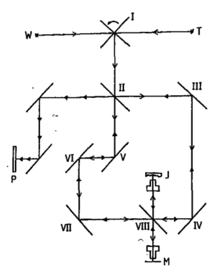
شكل رقم (٨/٩) : ميكروسكوب التداخل لنيك

ويبين الشكل رقم (٩/٩) مسار الضوء فى ميكروسكوب التداخل الضوئى «زايس- لنيك» . ويتم التداخل بين شعاعين منعكسين ، أحدهما من المرآة المرجع المستوية والشعاع الآخر منعكس من الجسم تحت الفحص . وتكون المرآة المرجع على هيئة غطاء cap لعدسة شيئية وعلى مسافة محددة منها . ويوجد ثلاث أغطية لهما انعكاسية ٣٠ ، ٦٠ ، ٩٠٪ لكل من عدسات الشيئية الثلاث المتوفرة فى الجهاز ، وقوة تكبيرها هى على الترتيب ١٠ ، ٢٥ ، ٦٠ مرة ، ويختار الغطاء cap بحيث يكون انعكاسيته أقرب ماتكون إلى انعكاسية العينة المراد فحصها . وكلما زاد مقدار التكبير كلما قرب الغطاء من العدسة ، وهذه هى ايضا ظروف ضبط المسافة بين السطح المراد فحصه والعدسة الشيئية المجودة فى مسار الأشعة لإضاءة العينة ولتجميع الضوء المنعكس من سطحها والذى يحمل المعلومات عن تضاريس هذا السطح .

ويمكن قياس تضاريس سطح الأجسام فى المدى من $\lambda/2$ إلى $20\ \lambda$ وذلك فى الاتجاه العمودى على هذا السطح . ويستعمل مصدر ضوئى أحادى الطول الموجى هو مصباح الثاليوم (λ = ٥٣٥ نانومتر) ، ويستبدل بهذا المصدر مصدر ضوئى أبيض للحصول على هدب بيضاء ذات رتبة تداخل منخفضة low-order white light fringes وذلك بدوران العاكس I الموضح فى الشكل رقم (٩/٩) . وتتم القياسات الدقيقة باستخدام الضوء أحادى طول الموجة ، ثم يحل الضوء الابيض محل مصباح الثاليوم ونحصل على هدب بيضاء ذات رتبة منخفضة ، وبعد ذلك يحل مصباح الثاليوم محل المصباح الأبيض ، وبهذه الطريقة تتكون هدب أحادية اللون ذات تباين contrast عال وواضحة على امتداد مجال الرؤية . وتستخدم عينية تلسكوب لرؤية الهدب المتكونة أو تستخدم كاميرا لتسجيل خريطة التداخل الضوئى .

ويتميز نظام التداخل الضوئى فى ميكروسكوب زايس - لنيك بإمكانية تغيير كل من اتجاه وقوة تفرق linear dispersion الهدب بضبط شريحة توضع فى مسار أحد الشعاعين . ويلاحظ أن أحد الفروق الأساسية بين هدب التداخل الضوئى الثنائى المتكونة بهذا النوع من الميكروسكوب وهدب فيزو محددة الموقع localised Fizeau fringes هى أنه بينما يكبر الجهاز الأول السطح المراد فحصه أولا وبعد ذلك يتم تكوين هدب التداخل الضوئى عليه ،

فإنه فى حالة هدب فيزو تتكون الهدب محددة الموقع قريبة من مقياس التداخل الضوئى ، وبعد ذلك تسجل صورة مكبرة لها على اللوح الحساس .



شكل رقم (٩/٩) : رسم تخطيطى لمسار الضوء فى ميكروسكوب التداخل لزايس – لنيك T مصباح ثاليوم ، W مصدر ضوء أبيض ، J الجسم ، M مرآة مرجع ، I مرآة عاكسة ، P لوح فوتوغرافى II مرآة نصف مفضضة III, IV, V,VI, VII ، أسطح مفضضة عاكسة

٩/٢/٧- مقياس التداخل الضوئى (لماخ وزندر) :

The Mach-Zehender interferometer

فى مقياس جامن للتداخل الضوئى Jamin interferometer تعمل الأسطح الأمامية للشريحتين المتكونتين لهذا الجهاز كمجزءات لحزمة الأشعة الضوئية ، وتعمل الأسطح الخلفية كمرايا مستوية ، ولايمكن ضبط هذه العناصر كلا على حدة ، ويكون فصل الشعاعين محددا بسمك هاتين الشريحتين . ويكون البعد كبيرا بين الشعاعين فى مقياس ماخ وزندر – Zehnder 1891, Mach 1892 – حيث تكون مجزءات حزمة الأشعة والمرايا العاكسة عناصر منفصلة عن بعضها .

ويبين الشكل رقم (١٠/٩) مسار الأشعة فى مقياس ماخ وزندر . S مصدر ضوئى أحادى طول الموجة عند المستوى البؤرى للعدسة L_1 وتنقسم حزمة متوازية من الأشعة – عند السطح النصف عاكس semi-reflecting surface (A_1) للشريحة الزجاجية D_1 ذات الأسطح المتوازية – إلى حزمتين تتحدان بعد انعكاسهما من المرآتين المستويتين

M_1 , M_2وذلك عند السطح النصف عاكس (A_2) للشريحة الزجاجية D_2 ذات الأسطح المتوازية وتخرج الأشعة لتتجمع بواسطة العدسة L_2 . افرض أن W_1 هى جبهة موجة مستوية plane wavefront فى الشعاع الذي يمر بين المرآه M_1 ، والشريحة الزجاجية D_2, W_2 هى جبهة الموجة المستوية المقابلة لها فى الشعاع الذى يمر بين المرآة M_2 ، والشريحة الزجاجية D_2, W_1' هى جبهة الموجة المستوية التقديريةwavefront virtual plane الموجودة بين المرآة M_2 والشريحة D_2 والتى تخرج من الشريحة الأخيرة منطبقة على W_1 . وعند نقطة مثل P على جبهة الموجة W_2 فإن فرق الطور التقديرى virtual phase difference بين الأشعة الخارجية – Born and Wolf, 1980 – يكون :

$$\delta = 2 \pi n h / \lambda$$

حيث :

$$h = PN$$

وهى المسافة الرأسية من P إلى W'_1 ,n هى معامل انكسار الوسط الموجود بين W_2, W_1' وتظهر عند النقطة 'p المرافقة للنقطة p هدب مضيئة فى حالة :

$$m\lambda = n\lambda , \qquad |m| = 0, 1, 2, ...$$

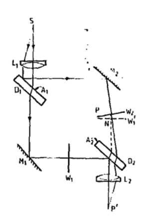
وتظهر عمليا ثلاث حالات للأجسام التى تغير من طور الموجة phase objects :

أ– الأجسام ذات البعدين Two-dimensional phase objects والتى لايتغير فيها معامل الانكسار فى اتجاه انتشار الأشعة .

ب– الأجسام المتماثلة قطريا Radially symmetric phase objects .

جـ– الأجسام غير المماثلة Asymmetric phase objects .

وفى الحالة الأولى يكون طول الجسم الذى يغير من طور الموجة هو L فى اتجاه انتشار الأشعة ، وبذلك يكون معامل الانكسار دالة فى y, z فقط .



شكل رقم (٩/١٠) : مسار الضوء فى مقياس التداخل (لماخ وزندر)

معادلة ازاحة الهدبة : Fringe shift equation

عند وضع جسم شفاف لتغيير طور الأشعة Phasor فى أحد مسارات الأشعة لمقياس ماخ ، وزندر (شكل رقم ٩/١١) فإن إزاحة الهدبة $\delta(y,z)$ تعطيها المعادلة :

$$\delta(y,z) = \frac{1}{\lambda}\int_{x_0}^{x_1} (n - n_0)\,dx \qquad n = n(x, y, z)$$

حيث n_0 هى معامل الانكسار فى وسط الشعاع الذى لم يحدث له تغير undisturbed beam ، λ هى طول موجة الضوء .

ولإثبات هذه المعادلة نلاحظ أن المسار الضوئى للشعاع الذى حدث له تغير disturbed ray مقاسا بالأطوال الموجية يكون :

$$N_d = \int_{x0}^{x1} \frac{dx}{\lambda}$$

ويعطى الفرق $(N_d - N_0)$ المضاعفات العددية للمقدار (2π) حيث يختلف بها الشعاعان فى الطور عند إعادة اتحادهما ويساوى بالكاد هذا الرقم إزاحة الهدبة $\delta(y,z)$.

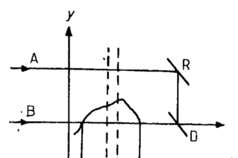
وإذا كان :

$$n = n(y,z)$$

ينتج أن :

$$n(y, z) - no = \frac{\delta\lambda}{x_1 - x_0} = \frac{\delta\lambda}{L}$$

وذلك فى حالة الجسم ذى البعدين الذى يغير من طور الموجة Two-dimentional phase object .



شكل رقم (٩/١١) :مسار الضوء الذى يعانى من تغيير فى طوره نتيجة نفاذه فى مغير الطور فى مقياس التداخل (ماخ وزندر) ، A شعاع عادى لم يعان من تغيير ، R عاكس B شعاع عانى من تغيير طوره ،D مجزء للأشعة

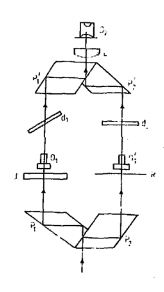
٩/٢/٨- مقياس التداخل الضوئى لليتز : Leitz interference microscope

يتكون هذا الميكروسكوب من ميكروسكوبين منفصلين لكنهما متماثلان ، يحتوى أحدهما (J) على الجسم المراد فحصه ويعطى الميكروسكوب الآخر موجة لم يحدث لها تغير undisturbed wave ، ويكون الميكروسكوب الأول صورة تتداخل مع الموجة المرجع المستوية المتكونة بالميكروسكوب الثانى .

ويبين الشكل رقم (٩/١٢) مسار الأشعة الضوئية فى ميكروسكوب ليتز للتداخل الضوئى .

P_1, P_1', P_2, P_2' منشورات تحل محل المرايا العاكسة ومجزءات الموجات الضوئية عند الأركان الأربعة لمقياس ماخ وزندر Mach-Zehender interferometer .

O_1, O_1' هما عدستان شيئيتان مصححتان لمالا نهاية وتكون العدسة L صورتين منطبقتين للمستويين R, J يمكن رؤيتهما بالعينية O_2 . وتسمح الشريحتان d_1, d_2 ذواتى الأسطح المتوازية - بتغيير طول المسار الضوئى Δ .



شكل رقم (١٢/٩) : النظام البصرى ومسار الأشعة فى ميكروسكوب التداخل الليتز

References

Barer R 1955 *Phase Contrast, Interference Contrast and Polarizing Microscopy* Analytical Cytology Series (New York: McGraw-Hill)

Beyer H and Schöppe G 1965 Interferenzeinrichtung für durchlicht Mikroskopie *Jenaer Rundschau* **10** 99-105

Born M and Wolf E 1980 *Principles of Optics* 6th edn (London : Pergamon) p315

Dyson J 1950 Proc. R. Soc. A **204** 170

——— 1953 *Nature* **171** 743

Fatou J E 1978 Optical microscopy of fibres in *Applied Fibre Science* ed. F Happey vol. 1 (London : Academic) Ch. 3

Faust R C ad Marrinan H J 1955 *Br. J. Appl. Phys.* **6** 351

Françon M 1961 *Progress in Microscopy* (London : Pergamon) pp94-128

Hamza A A 1986 *J. Microsc.* **142** 35

Hamza A A, Fouda I M and El-Farahaty K A 1986 *Int. J. Polym. Mater.* **11** 169

Hamza A A and Sikorski J 1978 *J. Microsc.* **113** 15

Heyn A N J 1954 *Fibre Microscopy* (New York: Interscience)

——— 1957 *Textile Res. J* **27** 449

Linnik W 1933 *C.R. Acad. Sci. URSS* **1** 21
Mach L 1892 *Z. Instrkde.* **12** 89
Nomarski G 1955 *J. Phys. Radium, Paris* **16** 95
Pluta M 1965 *Przeglad Wlókienniczy* **19** 261
——— 1971 *Opt. Acta* **18** 661
——— 1972 *J. Microsc.* **96** 309
Pluta M 1982 Mikroskopia Optyczna (Warszawa : Panstwowe Wydawnictwo Naukowe) In Polish)
Polskie Zaklady Optyczne (PZO) Instruments 1976 Biolar Polarizing Interference Microscope, Description and Instruction Manual
Steel W H 1986 *Interferometry* (Cambridge : Cambridge University Press)
Stoves J L 1957 *Fibre Microscopy* (London : National Trade Press)
Tolansky S 1948 *Multiple-Beam Interfrometry* (Oxford: Clarendon)
——— 1973 An Introduction to Interferometry (London : Longman) pp 210-23
Zehnder L 1891 *Z. Instrkde* **11** 275

الفصل العاشر

التشتت الخلفي لموجات الضوء بواسطة الألياف

Back-scattering of Light Waves from Fibres

١٠/١- حالة سقوط الضوء عموديا على محور الشعيرة

The case of a beam of light incident perpendicular to the fibre axis

تستخدم الألياف البصرية كوسط حامل للمعلومات ينفذ من خلاله الضوء فى أنظمة التراسل الضوئى ، وتتكون الشعيرة من إسطوانتين متحدتين فى المركز ومن مادتين عازلتين وطولها كبير جدا (كيلومترات) وذات قطر خارجى ≈ ١٢٥ ميكرومتر . وتتكون الإسطوانة الداخلية (لب الشعيرة) من مادة معامل انكسارها n_{core} يزيد قليلا عن معامل إنكسار مادة الاسطوانة الخارجية (قشرة الشعيرة) n_{clad} ومعاملا انكسار لب الشعيرة وقشرتها وقطر لب الشعيرة هى ثلاث بارامترات تحدد خصائص الشعيرات من حيث نفاذيتها للضوء . ومن المفيد وجود طريقة لا إتلافية non-destructive technique لقياس قيم معاملات انكسار وأقطار طبقتى هذه الألياف يمكن استخدامها لقياس وضبط هذه القيم فى أثناء تصنيع وسحب هذه الألياف .

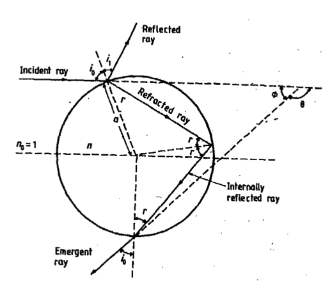
وكخطوة أولى نحو هذا الهدف سنشرح طريقة تعيين معامل انكسار وقطر الشعيرات التى ليس لها قشرة uncladded optical fibres التى اقترحها "Presby" (١٩٧٤) وتعتمد هذه الطريقة على تحليل الضوء المشتت خلفيا back-scattered light عندما يسقط شعاع ليزر مستمر cw laser عموديا على محورها . وبإجراء تحليل باستخدام طرق البصريات الهندسية ، نجد أنه فى النموذج المكون من هدب متعاقبة يكون موقع الانقطاع الحاد sharp cut-off يمكن أن يحدد معامل انكسار مادة الشعيرة المتكونة من طبقة واحدة ، بينما يمكن تعيين قطر هذه الشعيرة من المسافة بين نهايتين صغيرتين للضوء المتكون على هذا النموذج.

وسنقدم هنا طريقة Presby وتطبيقها على ألياف زجاج الصودا soda glass والسيليكا Silica والبيركس Pyrex والتى ليس لها قشرة ، وتتراوح أقطار هذه الألياف من

١٠٠ إلى ٣٠٠ ميكرومتر . وكما هو الحال فى طريقه Presby ، فإنه سيؤخذ فى الاعتبار انعكاس داخلى واحد .

١٠/١/١- تحليل التشتت الخلفى : Back-scattering analysis

افترض أن حزمة متجمعة من الضوء أحادى اللون وطول موجته λ سقطت على شعيرة من الزجاج ليس لها قشرة مع استخدام ضوء مستقطب فى اتجاه يوازى محور الشعيرة فى هذه القياسات ، حيث توضح حسابات معاملات فرنل Fresnel coefficients أن الضوء المستقطب فى اتجاه عمودى على محور الشعيرة يكون له حد أدنى من الشدة الضوئية minimum irradiance عندما يخرج من الشعيرة عند زوايا قريبة جدا من Φ_m ، كما هو موضح فى الشكل رقم (١٠/١) .



شكل رقم (١٠/١) : الشعاع الساقط والمنعكس والمنكسر .

وباستخدام طرق البصريات الهندسية نجد أنه عندما يسقط شعاع على الشعيرة ينتج شعاعا منعكسا وشعاعا منكسرا داخليا فى الشعيرة ، كما فى شكل رقم (١٠/١) . وفى الوسط المتجانس والمتماثل ضوئيا تكون هذه الأشعة عبارة عن خطوط مستقيمة وعند السطح الفاصل بين الشعيرة والوسط المحيط بها ، يتغير اتجاه هذه الأشعة حسب قانون الانعكاس وقانون سنيل Snell's law للانكسار ويمكن باستخدام هذين القانونين تتبع مسار الأشعة فى الشعيرة حتى تصل إلى الشعاع الخارجى الذى يكون نموذج التشتت

الخلفى . وبالإضافة فإنه يجب أن يؤخذ فى الاعتبار تأثيرات التداخل التى تحدد الشدة الضوئية irradiance فى هذا النموذج ، وذلك من خلال معاملات فرنل Fresnel coefficients .

وإذا كانت i هى زاوية سقوط شعاع ضوئى عند نقطة معينة ، r هى زاوية الانكسار فإن الشعاع ينحرف بزاوية مقدارها (i-r) عندما ينفذ إلى الشعيرة . وعند انعكاس هذا الشعاع عند السطح الخلفى للشعيرة فإنه يعانى انحرافا آخر مقداره (π-2r) . وأخيرا فإن هذا الشعاع يعانى انحرافا ثالثا مقداره (i-r) عند خروجه من الشعيرة . وبذلك نحصل على الانحراف الكلى Θ لهذا الشعاع من المعادلة :

$$\theta = \pi + 2i - 4r$$

ولحساب الحد الأدنى للانحراف الزاوى minimum angular deviation نساوى $^{d\theta}/_{di}$ هذا المعامل التفاضلى الأول بالصفر . وتعطى النتيجة – فى حالة وضع $n_o = 1$ – تعطى زاوية السقوط المقابلة لزاوية الانحراف الصغرى minimum deviation

$$\theta = \pi + 2i - 4\sin^{-1}\left(\frac{\sin\ i}{n}\right) \qquad (10.1)$$

$$\frac{d\theta}{di} = 2 - \frac{4\cos i}{(n^2 - \sin^2 i)^{1/2}} \qquad (10.2)$$

when $d\theta/di \rightarrow o$, hence $i = i_m$, and

$$\cos i_m = \left(\frac{n^2 - 1}{3}\right)^{1/2} \qquad (10.3)$$

وهذه هى قيمة i المقابلة لأقل انحراف مستقر stationary minimum ، ويمكن ملاحظة ذلك بأخذ المعامل التفاضلى الثانى $d^2\theta / di^2$ وملاحظة أنه موجب .

ومن المعادلة رقم (١٠-٣) يعرف نصف العرض الزاوى لنموذج التشتت The angular half width of the scatterd pattern (Φ_m) ، وعلاقته بالبارامترات المقاسة وهى h, L_m ونحصل من الشكل رقم (١٠/٢) على المعادلة الآتية :

$$L_m = h \tan \varnothing_m \qquad (10.4)$$

وحـيث إن :

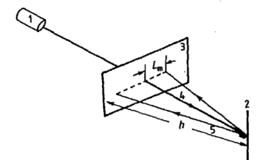
$$\varnothing = \pi - \theta$$

$$\varnothing_m = 4 \sin^{-1}\left(\frac{\sin i_m}{n}\right) - 2i_m \qquad (10.5)$$

ونحصل فى النهاية على :

$$\varnothing_m = 4 \sin^{-1}\left[\frac{2}{n\sqrt{3}}\left(1 - \frac{n^2}{4}\right)^{1/2}\right] - 2 \sin^{-1}\left[\frac{2}{\sqrt{3}}\left(1 - \frac{n^2}{4}\right)^{1/2}\right] \qquad (10.6)$$

وتوضح المعـادلة رقم (١٠-٦) أن مـوقع الانقطاع الحـاد sharp cut-off فـى نمـوذج التشتت الخلفى لشعاع الليزر عندما يسقط على شعيرة من الزجاج يسمح بتعيين معامل انكسار مادة الشعيرة .



شكل رقم (٢/١٠) : النظام البصرى المستخدم للحصول على نموذج التشتت الخلفى

1- حزمة أشعة ليزر هيليوم - نيون بطول موجى ٦٣٢,٨ نانومتر ، 2- شعيرة بدون قشرة

3- حائل أبيض 4- الأشعة الساقطة على الشعيرة 5- الأشعة المشتتة خلفيا .

١٠/١/٢- الطريقة المعملية لتعيين معامل انكسار مادة الشعيرة

Determination of refractive index of the fibre material, experimental procedure

يوضح الشكل رقم (١٠/٢) النظام البصرى المستخدم للحصول على التشتت الخلفى من

الألياف ، وفيه يمر شعاع ليزر هيليوم – نيون خلال فتحة فى حائل أبيض ثم يسقط على الشعيرة . ويسقط الضوء المشتت خلفيا back-scattered light على نفس الحائل ويسجل فوتوغرافيا . ويحجب الضوء المشتت فى الاتجاهات الأخرى من الوصول إلى الكاميرا . ويقع الضوء المشتت خلفيا كله فى مدى انحراف زاوى Ø ≈ ± ٢٠° مقاسا من اتجاه الشعاع الساقط . ويكون النموذج الكامل للتشتت متماثلا حول Ø = صفر . وطول موجه الضوء المستخدم λ = ٦٣٢٨ أنجستروم . ويبين الشكل رقم (٣/١٠) نموذج التشتت الخلفى لشعيرة من زجاج الصودا soda galss ذات قطر حوالى ٢٠٠ ميكرومتر .

شكل رقم (٣/١٠) : نموذج التشتت الخلفى لحزمة من الأشعة سقطت على شعيرة من زجاج الصودا قطرها حوالى ٢٠٠ ميكرون

٣/١/١٠– التشتت الخلفى لشعاع الليزر بواسطة شعيرة مكونة من لب وقشرة

Back-scattering of laser radiation from a cladded fibre :

يمكن تعيين الخصائص الفيزيائية للألياف البصرية المستخدمة في أنظمة التراسل الضوئى مثل الألياف ذات اللب والقشرة cladded fibres ، وذلك من التشتت الخلفي لشعاع ليزر يسقط عموديا على محور الشعيرة .

فقد درس هو ومعاونوه "Ho et al" عام (١٩٧٥) موضوع التشتت الخلفى فى حالة الأليـاف البصرية ، حيث $n_{core} > n_{clad}$ ، وهو شرط أساسى لحدوث الانعكاس الكلى الداخلى داخل لب الشعيرة وعند سطح الانفصال مع القشرة .

ويتميز التشتت الخلفى من الألياف البصرية ذات اللب والقشرة بوجود موقعين للانقطاع الحاد two sharp cut-offs .

التشتت الخلفى فى حالة شعيرة معامل انكسار طبقتيها $n_{core} > n_{clad}$ وباعتبار حدوث انعكاس داخلى واحد :

The case of an optical fibre with $n_{core} > n_{clad}'$, considering single reflection :

يمكن دراسة نموذج التشتت الخلفى فى هذه الحالة باستخدام التقريب فى طرق البصريات الهندسية ويبين الشكل رقم (١٠/٤) مسار الشعاع الساقط بعد انكساره ، ويوضح الزوايا المناظرة للانكسار والانعكاس ، وتبين المعادلة الاتية العلاقة بين هذه الزوايا :

$$\theta = \pi - 4\gamma' + 2i + 2i' - 2\gamma = \pi - \varnothing$$

ويوضح :

$$\left.\frac{d\varnothing}{di}\right| i = i_m = 0$$

يمكن أن نصل الى المعادلة الآتية فى i_m :

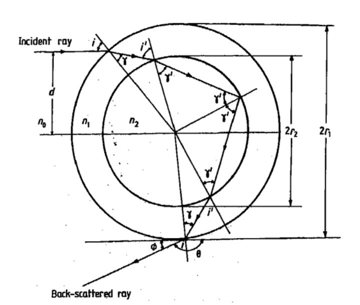
$$\frac{2\cos i_m}{[(n_2' r_2/r_1)^2 - \sin^2 i_m]^{1/2}} + \frac{\cos i_m}{(n_1'^2 - \sin^2 i_m)^{1/2}} -$$

$$\frac{\cos i_m}{[(n_1' r_2/r_1)^2 - \sin^2 i_m]^{1/2}} = 1 \qquad (10.7)$$

حيث :

$$n'_2 = {n_2}/{n_o} = n_{core} \text{ and } \qquad n'_1 = {n_1}/{n_o} = n_{clad}$$

و n_o هو معامل انكسار الوسط المحيط بالشعيرة (هواء)



شكل رقم (٤/١٠) : يوضح مسار الشعاع المشتت خلفيا باعتبار حدوث انعكاس واحد داخل لب الشعيرة التى لها البارامترات التالية : n_1 معامل انكسار القشرة ، n_2 معامل انكسار لب الشعيرة ، r_1 نصف قطر الشعيرة ، r_2 نصف قطر لب الشعيرة

ويمكن أن تحل المعادلة رقم (٧/١٠) تحليليا بصعوبة بالنسبة الى i_m ولكن يمكن الحصول على تقريب مناسب بوضع $r_1 \approx r_2$ ، وفى هذه الحالة نحصل على المعادلة الآتية لأكبر زاوية تشتت خلفى Φ :

$$\varnothing_m = 1 = 4\cos^{-1}\left\{\frac{1}{n_c}\left[\frac{4}{3}n_c^2 - \frac{4}{3}\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]^{1/2}\right\} - 2\cos\left\{\left[\frac{1}{\sqrt{3}}\left(n_i\frac{r_2}{r_1}\right)^2 - 1\right]^{1/2}\right\}$$

$$\left| - 2\cos^{-1}\left\{\frac{1}{n_s}\left[n_s^2 + \frac{1}{4}n_c^2 - \frac{4}{3}\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]^{1/2}\right\} + 2\cos^{-1}\left[\left[\frac{1}{n_s}\left\{n_s^2 + \frac{4}{3}\left[\frac{1}{4}n_c^2\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 - 1\right]\right\}^{1/2}\right]\right]\right.$$

حيث :

$$n_c = n_{core} \text{ and } n_s = n_{clad}$$

وفى حالة الشعيرة المتكونة من لب فقط unclad fibre يوضع :

$$r_1 = r_2,\ n_c = n_s = n \qquad \text{and } n_o = 1$$

وتؤول المعادلة الأخيرة إلى المعادلة التى توصل إليها "Presby" (١٩٧٤) .

التشتت الخلفى فى حالة ألياف بصرية باعتبار حدوث انعكاسين داخليين :

The case of optical fibres, considering two internal reflections :

توضح المعادلات الآتية تحليلا للتشتت الخلفى لشعاع الليزر عندما يسقط عموديا على شعيرة ويحدث انعكاسين داخليين عند سطح الانفصال بين لب الشعيرة وقشرتها . ويبين الشكل رقم (٥/١٠) مسار الشعاع الساقط الذى يعانى انكسارات وانعكاسات حيث توضح الزوايا فى كل حالة . وتعطى المعادلة الآتية العلاقة بين هذه الزوايا :

$$\theta = 2\pi - 6\gamma' + 2i + 2i' - 2\gamma = 2\pi - \varnothing$$

وبوضع :

$$\left.\frac{d\varnothing}{di}\right| i = i_m = 0$$

يمكن أن نصل إلى المعادلة الآتية فى i_m

$$\frac{3\cos i_m}{[(n_c r_2/r_1)^2 - \sin^2 i_m]^{1/2}} + \frac{\cos i_m}{(n_s^2 - \sin^2 i_m)^{1/2}} - \frac{\cos i_m}{[(n_s r_2/r_1)^2 - \sin^2 i_m]^{1/2}} = 1$$

وبفرض أن $r_1 \approx r_2$ فإن المعادلة الآتية تعطى قيمة أقصى زاوية تشتت خلفى Φ_m :

$$\varnothing_m = 2 = 6\cos^{-1}\left\{\frac{1}{n_c}\left[\frac{9}{8}n_c^2 - \frac{9}{8}\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]\right\}^{1/2} - 2\cos^{-1}\left\{\frac{1}{2\sqrt{2}}\left[\left(n_c\frac{r_2}{r_1}\right)^2 - 1\right]^{1/2}\right\}$$

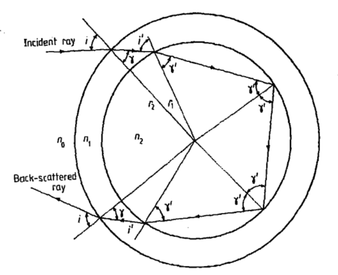
$$-2\cos^{-1}\left\{\frac{1}{n_s}\left[n_s^2 + \frac{1}{8}n_c^2 - \frac{9}{8}\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]^{1/2}\right\} + 2\cos^{-1}\left\{\frac{1}{n_s}\left[n_s^2 + \frac{1}{8}\left(n_c\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\frac{1}{9} - \frac{8}{9}\right)\right]^{1/2}\right\}$$

ويمكن الحصول على المعادل الآتية التى تعطى قيمة Φ_m لأى عدد من الانعكاسات الداخلية m داخل لب الشعيرة :

$$\varnothing_m = 2(m+1)\cos^{-1}\left[\left[\frac{1}{n_c}\left\{\frac{(m+1)^2}{m(m+2)}\left[n_c^2-\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]\right\}^{1/2}\right]\right] - 2\cos^{-1}\left[\left(\frac{(n_c r_2/r_1)^2}{m(m+2)}-1\right)^{1/2}\right]$$

$$-2\cos^{-1}\left[\left[\frac{1}{n_s}\left\{n_s^2+\frac{(m+1)^2}{m(m+2)}\left[\frac{n_c^2}{(m+1)^2}-\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]\right\}^{1/2}\right]\right]$$

$$+2\cos^{-1}\left\{\frac{1}{n_s}\left[n_s^2+\frac{(m+1)^2}{m(m+2)}\left(\frac{(n_c r_2/r_1)^2}{(m+1)^2}-1\right)\right]^{1/2}\right\}$$



شكل رقم (١٠/٥) : يوضح مسار الشعاع المشتت خلفيا باعتبار حدوث انعكاسين اثنين داخل لب الشعيرة التى لها البارامترات الآتية : n_1 معامل انكسار قشرة الشعيرة ، n_2 معامل انكسار لب الشعيرة ، r_1 نصف قطر لب الشعيرة ، r_2 نصف قطر الشعيرة .

ويمكن الآن حساب قيمة n_c بمعرفة :

$$\Phi_m = \tan^{-1} (L_m / h)$$

حيث $2L_m$ هو الطول الحقيقى بين النقط التى تعطى الانقطاع الحاد ، h هى المسافة بين الشعيرة ومركز نموذج التشتت الخلفى على الحائل .

ويتم تعيين قيمة n_s باستخدام طريقة الحد الفاصل لبيك Becke-line method – انظر . Hartshorne and Stuart, 1970 :

وبتعيين قيمة Φ_m عندما تكون m = 2, m = 1 يمكن حساب n_s, n_c عندما تكون $\frac{r_1}{r_2}$ معلومة .

ويستخدم الحاسب الآلى لإجراء هذه الحسابات .

١٠/١/٤- تشتت شعاع من الضوء يمر داخل الشعيرة فى اتجاه محورها

Light scattering of a beam incident through the fibre along its axis :

يحدث تشتت الضوء في الألياف البصرية نتيجة إلى العاملين الآتيين :

١- تشتت رالى Rayleigh Scattering وهو العامل الأساسى للفقد فى الشعيرة .

٢- عدم التجانس نتيجة لوجود فقاقيع صغيرة micro-bubbles وبلورات صغيرة micro-crystals وشقوق دقيقة micro fractures والتى تعتبر بالتقريب تشتتا متماثلا isotropic scattering وتحدث قدرا كبيرا من التشتت فى طول معين من الشعيرة نتيجة للتشوهات الهندسية والبصرية الصغيرة للألياف مثل الانحناءات الدقيقة micro-bending وأية تغيير فى قطر لب الشعيرة أو من الاتساع العددى numerical aperture Δ أو من بروفيل معامل انكسار الشعيرة .

١٠/٢- التشتت الخلفى فى اتجاه محور الشعيرة

Back-scattering along the optical fibre axis:

يقدم التشتت الخلفى الناتج من الشعيرة طريقة لا إتلافية تتطلب طرفا واحدا للشعيرة

ونطلق عليها طريقة "Optical time domain reflectometery (OTDR)" . وقـد تم تطويرها بواسطة « بارنوسكى وينسين Baronski and Jense » (١٩٧٦) كما شارك فى ذلك مؤلفون آخرون مثل « كوستا وسوردو Costa and Sordo » (١٩٧٧ a,b) ، « وبيرزونيك Personick » ، و« ديانو و سيت » (١٩٧٧) .

وتقوم هذه الطريقة على إرسال نبضة خلال الشعيرة ، فيتشتت جزء من الطاقة بواسطة الشعيرة ويوجه إلى الخلف ويتولد صدى النبضات مكونا نبضة مغلفة يتم استقبالها وتحليلها عند نفس طرف الشعيرة التى دخل منها الضوء .

١٠/٢/١- النظرية :

يعانى الضوء الذى ينتشر فى الشعيرة من تشتت يتبع الطاقة تشتت رايلى المتماثل isotropic Rayleigh scattering . وإذا اعتبرنا فقط هذا النوع من التشتت فإن الطاقة المشتتة – ونرمز لها $p_S(z)$ – عند بعد z من طرف الشعيرة الذى يدخل منه الضوء وفى مقطع طوله dz يكون :

$$P_S(z) = \gamma_S P(z)\, dz$$

حيث γ_S هى معامل الفقد الناتج من تشتت رايلى لوحدات متر $^{-1}$ ، وذلك باعتبار ثبات قيمته وإن كان عادة قد يتغير مع البعد نتيجة عدم التجانس فى تركيب مادة الشعيرة ولطول موجى λ تكون الشدة الضوئية عند بعد z على امتداد الشعيرة تعطيه المعادلة :

$$P(z, \lambda) = P(O, \lambda) \exp\left(-\int_0^z \gamma(\lambda,z)\, dz\right)$$

حيث $P(o, \lambda)$ تمثل الطاقة الضوئية التى دخلت الشعيرة ، $\gamma(\lambda, z)$ تمثل معامل الفقد فى وحدة الطول التى قد تعتمد على الموقع أى بعد المقطع من طرف الشعيرة . ويمكن تعريف معامل الفقد المتوسط كالاتى :

$$\bar{\gamma}(\lambda) = \frac{1}{z}\int_0^z \gamma(\lambda,z)\, dz$$

على ذلك :

$$P(z,\lambda) = P(0,\lambda) \exp(-z\bar{\gamma}(\lambda))$$

وبافتراض تماثل فى التوزيع الزاوى للطاقة المشتتة تقريبا ، يكون جزء الطاقة الذى دخل الشعيرة والذى يرمز له S تعطيه النسبة بين زاوية القبول المجسمة للشعيرة إلى الزاوية المجسمة الكلية . ينطبق ذلك فى حالة شعيرة معامل انكسار لبها ثابت القيمة STEP ، لكنه يكون صحيحا بالتقريب فى حالة شعيرة متدرجة معامل انكسار لبها :

$$S = \frac{\pi \Delta^2}{4\pi n_o^2} = \frac{\Delta^2}{4 n_o^2}$$

حيث Δ هى قيمة الفتحة العددية للشعيرة ، وتساوى $(n_o^2 - n_1^2)^{\frac{1}{2}}$ ، حيث n_o هى معامل انكسار لب الشعيرة n_1 معامل انكسار القشرة .

إذ الطاقة المشتتة خلفيا بين $z + dz, z$ هى :

$$P_{bs}(z) = \gamma_s \, SP(z) \, dz$$

وهى جزء من الطاقة الضوئية الكلية المشتتة عند البعد z من طرف الشعيرة التى دخل منها الضوء من مقطع طوله dz . ويكون اتجاهها إلي الخلف نحو مدخل الشعيرة ويحكمها زاوية القبول للشعيرة . وفى رحلتها إلى الخلف تعانى أيضا فقدا .

وتعطى المعادلة الآتية الطاقة المشتتة من $z + dz$, z التي تصل إلى الكاشف على افتراض أن كفاءة التزاوج هى η :

$$P_{bsd}(z) = \eta \, P_{bs}(z) \exp\left(- \int_0^z \gamma'(z) \, dz \right)$$

حيث γ' ترمز إلى معامل الفقد للضوء المشتت خلفيا .

وبالتعويض بقيمة $P_{bs}(z)$ التى تعطيها المعادلة :

$$P_{bs}(z) = \gamma_s \, SP(z) \, dz = \gamma_s \, SP(0) \exp\left(- \int_0^z \gamma(z) \, dz \right)$$

نحصل على :

$$P_{bsd}(z) = \eta \gamma_s \, SP(0) \exp\left(- \int_0^z (\gamma(z) + \gamma'(z) \, dz \right) dz$$

ويمكن اعتبار معاملي الفقد إلى الأمام وإلى الخلف متساويين ، ومن ثم :

$$P_{bsd}(z) = \eta\gamma_s SP(0) \exp(-2\bar{\gamma}z)\, dz$$

وتم تسجيل الطاقة المتولدة عند بعد z بعد فترة زمنية $t = 2z / \upsilon_g$ ، حيث υ_g هي سرعة مجموعة الأشعة الضوئية في الشعيرة group velocety . وإذا كان اتساع النبضة المرسلة هو ΔT ، فإن الطاقة الكلية p (t) الساقطة على الكاشف عند زمن t نحصل عليها بتجميع المعادلة السابقة في الفترة الزمنية $\Delta T = \frac{2\Delta z}{\upsilon_g}$.

وباعتبار ثبات قيمة $\exp(-\bar{\gamma}z)$ على امتداد هذا الطول وبالتعويض بقيمة $z = \upsilon_g T/2$ ينتج أن :

$$P(t) = \int_0^{\upsilon_g T/2} P_{bsd}(z)\, dz$$

$$= \eta\gamma_s SP(0) \exp(-2\bar{\gamma}\upsilon_g t/2)(\upsilon_g \Delta T/2)$$

$$= \eta\gamma_s \frac{c}{2n} \Delta TSP(0) \exp(-2\bar{\gamma}\upsilon_g t/2)$$

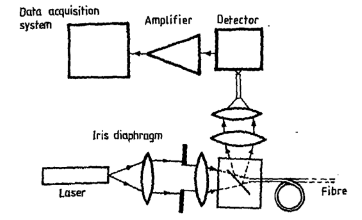
وذلك على أساس ثبات قيمة P (o) في الفترة الزمنية ΔT ، وإذا لم يكن كذلك فتؤخذ قيمة متوسطة . على ذلك فيكون شكل الموجة العائدة علي هيئة دالة آسية يمكن منها حساب معامل الفقد الكلي :

$$\frac{P(t_1)}{P(t_2)} = \exp\left(-\bar{\gamma}\frac{c}{n}(t_2 - t_1)\right) \rightarrow \bar{\gamma} = -\frac{n\,[\ln P(t_1) - \ln P(t_2)]}{c\,(t_2 - t_1)}$$

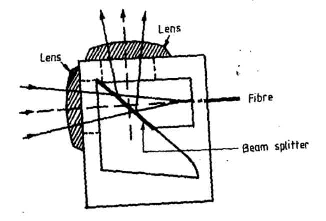
ويبين الشكل رقم (١٠/٦) (رسما توضيحيا) للنظام البصري الذي استخدمه Costa and Sordo (1977 - b) لقياس التشتت الخلفي .

واستخدم "Costa and Sordo" (١٩٧٧ b) خلية خاصة موضحة في الشكل رقم (١٠/٧) لتقليل الانعكاس من سطح الشعيرة الذي يدخل منه الضوء . وتملأ هذه الخلية بسائل معامل انكساره يساوي معامل انكسار لب الشعيرة $(n_L = n_{core})$ ، وتحتوي هذه

الخلية على مجزئ لحزمة الأشعة beam splitter ، وتوضع الشعيرة فى الخلية من خلال فتحة ضيقة بواسطة micromanipulators .



شكل رقم (٦/١٠) : النظام البصرى المستخدم فى قياس التشت الخلفى (من Costa and Sordo, 1977-b)



شكل رقم (٧/١٠) : خلية يملؤها سائل له معامل انكسار مساو لمعامل انكسار لب الشعيرة يتم بواسطته تقليل الانعكاس للضوء الساقط على طرف الشعيرة (من Costa and Sordo, 1977-b)

References

Barnoski M K and Jensen S M 1976 *Appl. Opt.* **15** 2112

Costa B and Sordo B 1977a *CSELT Rep. Tec.* **5** 75

——— 1977b *Third European Conf. on Optical Communication, Munich, September 1977*

Daino B and Sette D 1977 *Eurocon, Venice, May* 1977

Hartshorne N H and Stuart A 1970 *Crystals and the Polarising Microscope* (London : Edward Arnold) pp 559-63

Ho P S, Mahric M E and Epstein M 1975 *Appl. Opt.* **14** 2598

Personick S D 1977 *Bell Syst. Tech. J.* **50** 355

Presby H M 1974 *J. Opt. Soc. Am.* **64** 280

الفصل الحادى عشر

التحليل الأوتوماتيكى لخريطة هدب التداخل الضوئى

Automatic Analysis of Interferograms

١/١١- خطوات تحليل خريطة هدب التداخل

The steps of analysis of interferograms :

التحليل الكمي للصور التى نشاهدها أو نحصل عليها باستخدام الميكروسكوب الضوئى يحدده قوة إبصار عين الراصد وقدرته الذهنية . وإن تطبيق الألكترونيات الرقمية لتحليل الصور التى نحصل عليها باستخدام الميكروسكوب يبشر بحدوث تطوير وتقدم فى المستقبل القريب والوصول الى درجة ومرحلة متقدمة مختلفة تماما عن الحاضر .

قام "Rosen" (١٩٨٤) بتجميع وعرض طرق إدخال الألكترونيات فى مجال الفحص بالميكروسكوب الضوئى ، تناول عرضة بدءا بفحص الأجسام الذى يتم بواسطة الميكروسكوب الضوئى إلى الحصول على صور لها ، ثم تحويلها إلى إشارات رقمية وتخزين هذه الصور ، يلى ذلك تحليل للصور وتسجيل للمعلومات وكتابة النتائج .

ويختص هذا الفصل بإدخال الألكترونيات فى مجال ميكروسكوبات التداخل الضوئى . فالجسم هنا هو خريطة هدب التداخل interferogram ، سواء كانت هدب تداخل ثنائية أو هدب تداخل متعددة ، أو هدب تداخل ناتجة عن مسار مفرد أو مسار ثنائى . يتم فيه شرح التحليل الأوتوماتيكى لخرائط الهدب و استخلاص بروفيل معامل انكسار الألياف أى قيم معاملات الانكسار عند كل نقطة على مقطع عرضى للألياف . وقد شمل الفصل على أسماء الباحثين السابقين الذين قاموا بتطبيق التحليل الأوتوماتيكى لخرائط هدب التداخل واستخلاص معاملات انكسار الألياف مع نبذة قصيرة موجزة عن مساهماتهم . هذا بالإضافة إلى تناول المجال بالتفصيل بعد عرض تتابع خطوات إدخال الألكترونيات الذى قدمه " Rosen " (١٩٨٤) فى مجال ميكروسكوبات التداخل الضوئى .

ولقد طور " Wonsiewicz et al " (١٩٧٦) تكنيك أو تقنية لاختزال المعلومات من صور هدب التدخل باستخدام هدب التداخل الناتجة من شريحة عرضية من الألياف . وتقوم الطريقة على تحويل هدب التداخل إلى إشارات رقمية باستخدام جهاز الشدة الضوئية الماسح Scanning microdensitometer ، يلى ذلك استخدام الحاسب الآلى لتعيين موقع الخط الذى يمر بمركز أو منتصف كل هدبة ، ثم يتم تحويل هذه البيانات إلى قيم معاملات انكسار وقيمة نصف قطر مقطع شعيرة الألياف وهى بروفيل معامل الانكسار عبر مقطع الشعيرة . كما قاموا بتطوير برنامج الحاسب الآلى المطلوب لتسكين البيانات على أنسب منحنى يتبع دالة أسية .

ولقد استخدم "Presby et al" (١٩٧٨) نظاما أتوماتيكيا مكونا من كاميرا فيديو ومحول رقمى وحاسب آلى لمعالجة البيانات التى يخرجها ميكروسكوب التداخل باستخدام طريقة الشريحة العرضية لشعيرة الألياف . وقد أمكنهم استخلاص بروفيل معامل الانكسار للألياف متدرجة معامل انكسار لبها .

وقام "Boggs et al" (١٩٧٩) وكذلك "Presby et al" (١٩٧٩) ، وأيضا "Marcuse and Presby" (١٩٨٠) مستخدمين طريقة التداخل الضوئى المستعرض ، حيث تغمر الشعيرة فى سائل له نفس معامل انكسار قشرتها ويضاء بحزمة اتجاهها عمودى على محور الشعيرة . وقد قدموا وصفا لمكونات نظام بصرى يتم بواسطته إجراء قياسات لبروفيل المسار الواحد أوتوماتيكيا . فلقد استخدم ميكروسكوب التداخل للضوء النافذ "Leitz" الذى يقوم على مسار مفرد وحزمتين ضوئيتين ومعه كاميرا فيديو ونظام لتحليل صور الفيديو . وشملت طريقتهم فى القياس التسجيل باستخدام الفيديو وتحويل صور هدب التداخل إلى رقمية تحت تحكم أو سيطرة الحاسب الآلى .

وطبقا لما قدمه "Rosen" (١٩٨٤) فإن خطوات العمل وتتابعها فى التحليل الأوتوماتيكى لخرائط هدب التداخل الناتجة من ميكروسكوبات التداخل هى كما يلى :

أ- تصميم وتنفيذ مقياس التداخل على قاعدة stage الميكروسكوب .

ب- الحصول على صورة مكبرة لخريطة هدب التداخل . هذه الصورة المتكونة للهدب

يمكن أن ترى بالإبصار العادى أو تسجل على لوح فوتوغرافى أو تظهر على شاشة تليفزيون ، ويجب أن تستمر فترة زمنية كافية لاستخلاص البيانات الكمية منها .

جـ- استخلاص المعلومات العددية من الصورة وتخزينها . ويتم القياس باستخدام graticule عند عدسة العينية أو باستخدام صور مسجلة كمرجع ثم يتم إرسالها إلى آلة حاسبة أو حاسب آلى .

د- تحليل البيانات الناتجة من القياس .

هـ- تسجيل نتائج التحليل .

١١/١/١- الحصول على الصورة Picture acquisition :

يحصل المشاهد من خلال الميكروسكوب - سواء كان ينظر إلى الميكروسكوب أو الى صورة أو إلى شاشة تليفزيون - يحصل على صورة لمجال الرؤية كاملا من أول وهلة . فاستجابة خلايا الشبكية للمشاهد تتم جميعها آنيا أى فى نفس اللحظة ، وهى فى وضع موازٍ لمساحة الرؤية المضاءة . فكاميرا التصوير تسجل صورة المنظر على فيلم حساس by parallel acquisition . وعند استخدام كاميرا التليفزيون يتم تحويل الصورة إلى إشارة كهربية بطريقة تسمح بقراءتها serially ، كنقطة تتحرك على خط مستقيم ، حيث تتبع فى مسارها خطوطا مستقيمة متتابعة تغطى الصورة .

وحديثا أدخلت بدائل لهذه الطريقة بأجهزة تستخدم كواشف من الصمام الثنائى diode تسمح للتيار الكهربى أو الإشارات بالمرور فى اتجاه واحد فقط ، وقد وزعت على شكل مصفوفة أو مجموعة متراصة يشغل كل كاشف موضعا معينا بترتيب معين ، أو باستخدام مكونات مشحونة Charge coupled devices على شكل مصفوفة .

١١/١/٢- تحويل الصورة إلى أرقام وتخزينها :

Digitisation and storage of the image

بالرغم من أنه يمكن تخزين الصورة ألكترونيا فى شكل تناظري analogue form ، مثلا على شريط فيديو ، إلا أن دائرة اهتمامنا هنا هى النظم التى يتم عن طريقها تحليل الصور ومنها يكون ضروريا تحويل الصورة إلى أرقام قبل تحليلها . وهناك مطلبان لتحويل الصورة

إلي أرقام :

أ- بالنسبة إلى الموقع أى تحديد إحداثى الموقع .

ب- بالنسبة إلى قيمة الشدة الضوئية أى تحديد منسوب الشدة الضوئية عند هذه النقطة

يعنى هذا أن خريطة هدب التداخل المتكونة فى مستوى الصورة بواسطة ميكروسكوب التداخل الضوئى أو باستخدام النظام البصرى الذى يسمح بتكوين هدب التداخل عند النفاذ أو عند الانعكاس ، يتم إحلال مجموعة set من الصور النقطية محلها – تسمى هذه الصور النقطية pixels – تلك التى يمكن توصيفها بقيمتى إحداثيين وقيمة الشدة الضوئية لضوء أحادى الطول الموجى عندها ، ويصاحب ذلك معامل التلوين chrominance index للهدب المتكونة بالضوء الأبيض . وتتوقف كفاءة عملية تحويل الصورة إلى رقمية على عدد الصور النقطية فى وحدة المساحات وعدد مناسيب الشدة الضوئية التى يمكن التفرقة بينها .

الترقيم الفراغى : Spatial digitisation

يتم ترتيب الصور النقطية على هيئة شبكة أو شبكية وتتحدد المساحة المحددة لكل صورة نقطية بالشبكة المكونة من خطوط أفقية ورأسية متقاطعة مكونة لمواقع رباعية الشكل متساوية المساحات ، وأكثر الشباكات استخداما تكون فى شكل مستطيل . وترتبط قوة التحليل الضوئى التى يمكن الحصول عليها بكثافة الصور النقطية فى الشبكة . والقيمة ٥٠٠ × ٥٠٠ لشبكة مربعة الشكل يمكن اعتبارها أقل قيمة مفيدة .

وفيما يلى اشتقاق تعبير رياضى لعدد الصور النقطية ونرمز له بالحرف p فى خط مستقيم طوله I على الصورة بدلالة عدد العينات المأخوذة sampling frquency F_S . فلكل نقطة على جسم مضاء تم اختيارها بواسطة الميكروسكوب لها نموذج pattern خطوط حيود متكونة فى المستوى الذى تتكون فيه الصورة . فللعدسة التى نافذتها مستديرة circular aperature يحدد خطوط الحيود قرص أيرى Airy disk الذى تغير فيه الشدة الضوئية تبعا للدالة $(2 J_1 (x) / x)^2$ ، حيث $J_1 (x)$ ترمز إلى دالة Bessel للمتغير x من الدرجة الأولى و x هى المسافة من مركز خطوط الحيود .

وقد أفاد "Hopkins" (١٩٤٣) بأنه يمكن تقريب معادلة أيرى إلى دالة جاوس وهى exp $(-x^2/2r^2)$ والتى تتمكن من احتواء التأثيرات الثانوية أى من الدرجة الثانية التى تظهر عند استخدام عدسات لها اتساع عددى كبير . ويرمز إلى نصف القطر فى دالة جاوس بالرمز r الذى تصل الشدة الضوئية عنده فى صورة خطوط الحيود إلى ٦٠٪ من قيمتها عند المنتصف أو المركز .

وتعطى تحولات فوريير لدالة جاوس طيف التردد الفراغى لخطوط الحيود التى تم تسجيلها – انظر : Eccles et al 1976 a –و من الواضح أن أى خط على الصورة نحصل عليه عن طريق convolving the pattern of illumination التى تحوى خط عبر الجسم بمجموعة خطوط الحيود الناتجة من نقطة مضيئة . ولقد قدم "Rosen" العلاقة الآتية التى تعطى عدد الصور النقطية p على خط طوله 1 على الصورة :

$$P = 3l / \pi m\ (0.22\lambda/NA) \qquad (11.1)$$

حيث NA هى الاتساع العددى لشيئية الميكروسكوب ، m قوة التكبير ، λ طول موجة الضوء أحادى الطول الموجى المستخدم .

وقدم "Eccles et al" (١٩٧٦a,b) وصفا لنظام مبرمج باستخدام flying spot microscope الذى يمكن عن طريقه الحصول على بيانات عددية بتحويل الصورة إلي أرقام . وقد استخدم المعادلة الآتية :

$$P = 3l / \pi\ [\ r_1^2 + (\ 0.22\lambda m\ /\ NA)^2\ ]^{1/2} \qquad (11.2)$$

حيث r_1 ترمز إلى نصف قطر scan tube للميكروسكوب الذى عنده تصل الشدة الضوئية I إلى ٠,٦١ من قيمتها عند المنتصف وللميكروسكوب الذى يستخدم شيئية لها اتساع عددى NA مساو ١,٢٥ وقوة تكبير ١٢٠٠ باستخدام ضوء طوله الموجى λ تساوى ٥٠٠٠ أنجستروم مستخدما شيئية عالية القوة وسائل الغمر oil immersion ويكون صورة عرضها ٥سم فى كاميرا التليفزيون والعدد المناسب للصور النقطية فى كل خط هى p تساوى ٤٥٢ (المعادلة ١١-١) .

هذه الحسابات لاتتضمن أولا تأخذ فى الاعتبار الترشيح الفراغى spatial filtering الذى يدخل عن طريق حزمة الألكترونات التي تقرأ الصورة الكامنة داخل الكاميرا . ولعل

كثافة الصور النقطية التى تصل إلى ٢٥٦ × ٢٥٦ تكون مناسبة للحصول على كل المعلومات المتاحة . وعمليا تمثل قيم الإحداثيات y, x لكل صورة نقطية فى النظام الأوتوماتيكى بواسطة صف من البايت(*) bits (صفر ، وحدات) ، فالصف الذى يحوى ٨ بايت يوفر ٢٥٦ أى قيم عددها ٢^٨ ، والصف ٩ بايت يوفر ٥١٢ قيمة . ويوجد مكونات أجهزة قياسية صممت لتتعامل مع الصفوف عالية الكفاءة التي أطوالها ٨ بايت ، ١٢ بايت ، ....

هذا وظهر اتجاه منذ عام ١٩٧٠ عند استخدام النظم الميكروسكوبية التى تعمل أوتوماتيكيا أن تستخدم شبكة ٢٥٦ × ٢٥٦ من الصور النقطية ، أما الآن فإن شبكات تحتوى على ٢^٩ ، ٢^١٢ صف وعمود أصبحت متوفرة .

تحويل الإشارة إلى أرقام : Singal digitisation

فى جميع الحالات العملية يوجد حد أعلى لعدد مناسيب الشدة الضوئية التى نحتاجها لترقيم إشارة وباستخدام الرياضيات التى تقوم على استخدام رمزين رقميين هما الصفر والواحد (1,0) يمكن تمثيل أو وصف الإشارة بصف من عدد m بايت قابل للتقسيم إلى عدد N مناسيب ، حيث $N = 2^m$. فإذا كانت النسبة بين الإشارة إلى الضوضاء signal to noise فى الكاشف $\frac{s}{n}$ فإن $N = {}^{(S/n)} / 1.4$. هذه العلاقة قد وصل إليها "Billingsley" (١٩٧١) . وللأجهزة الألكترونية الحساسة $\frac{s}{n}$ التى تعمل بقيمة تساوى ١٠٠ ، N = ٧١ منسوبا ، يحتاج التعبير الترقيم الثنائى إلى عدد ٧ بايت تعبر عن ١٢٨ منسوب . وعند استخدام ميكروسكوب تليفزيونى يعمل بقيمة $\frac{s}{n}$ = ٣٠٠ : ١ ، N = ٢١٤ فإن هذا يحتاج إلى شفرة أو كود يحوى ٨ بايت .

تخزين الصورة : Storage of the image

يمكن تخزين الصور على ألواح فوتوغرافية أو على أشرطة فيديو . وكان نتيجة التقدم فى الدوائر المتكاملة integrated circuitry وتوفر أقراص تخزين بجميع المقاسات ، أنه أصبح ممكنا تخزين مكتبات كبيرة من الصور على هيئة أرقام . فإذا حولنا صورة إلى

(*) وكلمة bit بايت مصطلح مختصر مكون من الحرف الأول من الكلمة الأولى والحرفين الأخيرين من الكلمة الأخيرة من العبارة الآتية :
Binary digIT . وتعنى رقما ثنائيا (0,1) ، ويطلق هذا التعبير على موقع صغير كاف لتمثيل رقم ثنائى .

شبكة من الصور النقطية أى تجزئتها إلي ٥١٢ × ٥١٢ صورة نقطية وأن الإشارة ضوئية لكل صورة نقطية قد أمكن تحويلها إلى شفرة أو كود يمثلها كلمة تقوم على ٨ بايت ، السعة المطلوبة لتخزين الصورة بأكملها هو 0.25 Mbyte أى ٢٥, ٠ مليون بايت – البايت يعنى موقع تخزين مكون من عناصر ثنائية – فمجموعة من المواقع الثنائية ينظر إليها كوحدة متكاملة تتكون فى معظم النظم من ثمانية مواقع 8 bits ، وبعض النظم ١٦ موقعا أو ٣٢ موقعا وإن كان المستخدم منها فى تمثيل رمز من رموز البيانات الرقمية ٨ مواقع فقط . والبايت هو الموقع الكافى لتخزين رمز واحد فقط من رموز البيانات . والسعة السابق ذكرها تغطى كمية هائلة من المعلومات مساوية لمحتويات الكتاب متوسط الحجم ، لكن أقراص التخزين حتى القرص المرن الصغير Floppy disk يمكن ان يختزن بيسر هذه الكمية من البيانات . إن امكانية الاحتفاظ بالصورة فى ميكروسكوبات التداخل الأوتوماتيكية ضرورة هامة . الاحتفاظ بها فى مخزن حيث تكون صالحة لاستخلاصها وتحليلها فى ذاكرة التوصل العشوائى وهى الذاكرة التى يتم التوصل إلى أى موقع مباشرة دون اتباع تدرج أو تسلسل معين ، سواء من أجل الإدخال أو الإخراج يعني هذا الاحتفاظ بها فى وحدة أو جهاز تخزين ذى مواصفات وتصميم يسمح باستخدامه لتخزين بيانات تم تنظيمها بأسلوب التوصل المباشر أو العشوائى وهى الخازنة ذات الوسيط التى تجعل جميع مواقعه متاحة للتوصل المباشر دون ترتيب وبحيث لايؤثر أو يرتبط توقيت التوصل بموقع البيان على الوسيط (R. A. M) .

ويمكن الآن العمل بذاكرة توصيل عشوائى سعتها تصل إلى عدة ملايين بايت Mega bits .

٣/١/١١- تحليل الصور : التحليل الأوتوماتيكى لخريطة هدب التداخل واستخلاص بروفيل معامل الانكسار للألياف باستخدام طريقة التداخل الضوئى للشريحة العرضية :

Picture analysis : automatic analysis of interferograms and deduction of the index profile of fibre using the interferometric slab method

قدمنا فى الفصل الخامس النظرية التى تقوم عليها طريقة التداخل الضوئى لشريحة

عرضية لشعيرة . ويمكن اشتقاق تعبير رياضي يربط بين معامل الانكسار للب الشعيرة ونرمز له n (x,y) وإزاحة الهدبة ونرمز لها S (x,y) كما يلي :

$$n(x,y) = n_{clad} + \frac{\lambda S(x,y)}{Dt} \qquad (11.3)$$

حيث D ترمز إلى البعد بين هدبتين متعاقبتين ، t سمك الشريحة .

يمكن قياس إزاحة الهدبة باستخدام تدريج في عينية الميكروسكوب وحساب معامل الانكسار من المعادلة (١١-٣) باستخدام برنامج حاسب آلي ، أو قياس إزاحة الهدبة المسجلة على لوح فوتوغرافي لصورة الهدب المتكونة من خلال الميكروسكوب تبعا لما أفاد به "Wonsiewicz et al" (١٩٧٦) و "Presby et al" (١٩٧٨) وتقوم طريقةWonsiewicz على تعيين مجموعة الإحداثيات الكرتيزية Cartesian coordinates التي تصف شكل هدب التداخل .

وتم التحديد الأوتوماتيكي لموقع هدب التداخل بالطريقة الآتية المشروحة في شكل رقم (١/١١):

أ- تحويل الفيلم إلى صورة رقمية وتسجيلها كشفرة على شرائط غير مغناطيسية بواسطة فكسميل Facsimile(*) وهو نظام نقل الصور أليكترونيا عن بعد .

ب- يتم قراءة الشريط الممغنط باستخدام حساب آلي متعدد الأغراض وتحديد موقع الهدب .

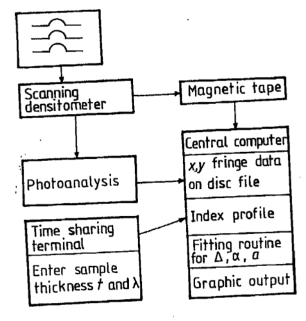
جـ- تدون قيم الإحداثيات y,x للهدب على ملف قرص الذاكرة لاستخدامها في الخطوات اللاحقة .

ولتحويل خريطة هدب التداخل إلى شفرة يتطلب استخدام جهاز ماسح لقياس الشدة الضوئية ودرجة السواد Scanning microdensitometer ذي كفاءة عالية ، وقوة

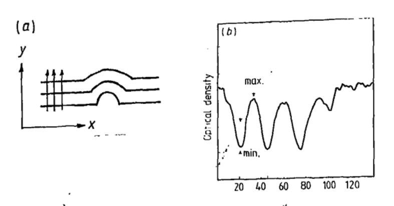
(*) نظام فكسميل هو نظام استخدام شبكات الاتصال الصوتية في نقل النقط الضوئية المكونة للصور والرسومات من الورق بواسطة جهاز يقوم بتحويلها إلى نبضات قابلة للنقل بواسطة خط التليفون العادي بعد إضافة تجهيزات خاصة ، ثم نقلها من خلال شبكة الاتصال المزودة بحاسب آلي للتحكم والتوجيه إلى الطرف المقصود من الشبكة حيث يستقبلها جهاز مماثل لجهاز الإرسال يقوم بتحويل النبضات إلى صورة أو بيان أو رسم مماثل تماما للأصل .

الفصل R.P. ٤٠ خط فى المليمتر ومنسوب gray scale هو ٢٥٦ منسوبا . ويتم تشفير الصورة بلصق الفيلم الشفاف إلى سطح اسطوانة تدور ، فتقوم حزمة الأشعة الضوئية الثانية بمسح الفيلم . ويتم تسجيل الشدة الضوئية النافذة بواسطة كاشف ضوئى ، وتظهر كمتوالية من عدد n من الأعداد الصحيحة تتراوح بين صفر ، ٢٥٥ التى تتناسب مع الكثافة الضوئية لكل نقطة من النقط n على الفيلم . ويعاد مسح الفيلم خطا بعد خط ليغطى المساحة المطلوبة من خريطة هدب التداخل . ويتم المسح للهدب باستخدام أقل قيمة لقوة الفصل المتاحة وهى ١٠ خط لكل ملليمتر مع تسجيل ٢٢٠ نقطة لكل خط و ٢٥٠ خط لكل خريطة هدب . وتتم عملية التعرف والحصول على الهدب بمسح الفيلم عموديا على اتجاه الهدب . والشكل رقم (٢/١١) لخط تم تشعيره بواسطة جهاز فكسميل facsimile device ويمثل تغير الكثافة الضوئية مع موقع البروفيل . وتقع الهدب على خط مسح معين .

وحصيلة برنامج تعيين مواقع الهدب هو مصفوفة من y, x لمركز الهدب تحت الفحص والشكل رقم (٣/١١) يبين رسما لهذه المصفوفة ويتم تخزين بيانات المصفوفة على ملف قرص ، ويكون ذلك المدخلات للبرنامج الذى يتم عن طريق حساب بروفيل معاملات الانكسار



شكل رقم (١/١١) : رسم تخطيطى لطريقة التحليل الأوتوماتيكى



شكل رقم (٢/١١) : (أ) يبين نتيجة مسح الهدب فى الاتجاه الموضح منحنى الكثافة الضوئية وتغيرها مع قيم λ فى (ب)

٢/١١– حساب بروفيل معامل الانكسار :

Calculation of the index profile

يتم حساب بروفيل معامل الانكسار n (r) من قيم x,y ، حيث n (r) تمثل معامل الانكسار عند بعد r من مركز لب الشعيرة مطروحا منه معامل انكسار قشرتها ، وذلك باستخدام برنامج تفاعلى أو جوارى (*) interactive . ويتم ذلك عن طريق اتباع الخطوات الثلاث الآتية :

أ– خط أساسى أو الأساس Base line لحساب Δn ، ويتم تعيين قيمة الإحداثى y المناظرة للمعامل n_{clad} لكل هدبة مختارة ، وتستخدم قيمة الإحداثى y للقشرة للهدبة المركزية كخط الأساس لتعيين إزاحة الهدب Δy ، كما هو موضح فى الشكل رقم (٣/١١) ، وكذلك قيمة y لمعامل انكسار القشرة لكل هدبة مختارة لتعيين زاوية ميل مقياس التداخل ، والذى منه يحسب البعد بين أى هدبتين متعاقبتين D فى المناطق التي يكون فيها معامل الانكسار منتظم القيمة .

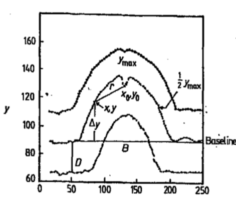
ب– تعيين موقع محور الشعيرة (مركز أو منتصف قلب الشعيرة (x_o, y_o)) : يمكن تعريف النقطة x_o بأنها منتصف أو مركز الإحداثيات x التى عندها $y = \frac{1}{2} y_{max}$ وبتعيين موقع (x_o, y_o) يمكن حساب البعد r من محور الشعيرة عند كل نقطة (x, y) على الهدبة المركزية من العلاقة $r^2 = (x - x_o)^2 + (y - y_o)^2$ وتقاس r بوحدات ميكرون مع

أخذ قوة تكبير الميكروسكوب فى الاعتبار .

جـ- تعيين بروفيل معامل الانكسار : يتم تعيين كل من إزاحة الهدب Δy وقيمة نصف القطر r لكل نقطة (x,y) على الهدبة المركزية . ويحسب قيم Δn (r) بدلالة البعد D بين أى هدبتين متعاقبتين ، وسمك الشريحة t وطول موجة الضوء أحادى الطول الموجى λ من العلاقة :



$$\Delta n\,(r) = \frac{\Delta y}{D}\frac{\lambda}{t} \qquad (11.4)$$



شكل رقم (٣/١١) يبين مصفوفة قيم (x,y) لموقع الخط المركزى لكل هدبة الذى تم تعيينه من برامج التحليل الضوئى

ويعطى شكل (٤/١١) بروفيل معامل الانكسار . والمنحنى الكامل هو لقيم أقل مربعات ليتفق fit مع المعادلة :

$$\Delta n\,(r) = \begin{cases} \Delta n_o\left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^{\alpha}\right] & r < a \\ o & r \geq a \end{cases}$$

والسبب فى انخفاض قيمة معامل الانكسار عند منتصف الشعيرة ناتج من فقد $Ge\,O_2$ من الطبقات الداخلية للب الشعيرة ، وهو مكون من $Ge\,O_2 - SiO_2$ أثناء الطريقة الكيميائية المعدلة القائمة على ترسيب البخار MCVD لإنتاج الألياف الضوئية ، ويسمى هذا الانخفاض بالفجوة المركزية Central dip .

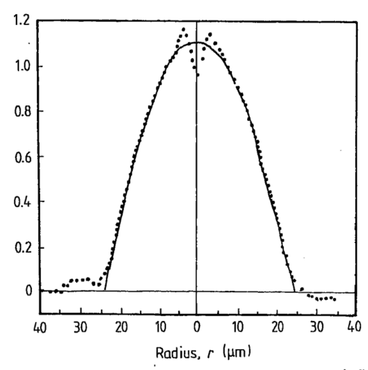
(*) نظام الحاسب الألكترونى يعمل بنظام تشغيل ، يتيح للمستخدم الاتصال المباشر بالحاسب والتعامل معه بأسلوب حوارى ، حيث يتم إدخال متغيرات البيانات بواسطة عبارات آمره ، يدخلها المستخدم وتصله إجابة النظام عليها بصورة فورية .

وقد استخدم "Presby et al" (١٩٧٨) كاميرا فيديو، ومرقم digitiser ، وحاسب آلى desk computer ، محولا الصور إلى أرقام كما هو موضح فى الشكل رقم (١١/٥) لمعالجة الناتج أو المخرجات من ميكروسكوب التداخل مباشرة بتطبيق طريقة التداخل الضوئى من الشريحة العرضية . وتعمل كاميرا الفيديو خلال ميكروسكوب التداخل وترسل إشاراتها الكهربية إلى مرقم الذى يعمل عمل محول تناظرى رقمى analog-to-digital converter(*) بدرجة دقة تساوى ٨ بايت بعد تحديد نقط معينة مختارة فى مجال رؤية الفيديو ، يتحكم برنامج الحاسب الآلى فى اختيار النقط ويتم استجماع البيانات كما يلى :

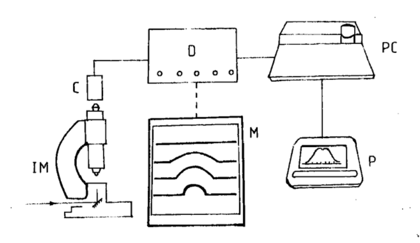
يوجه الحاسب المرقم ليجمع بيانات الشدة الضوئية على خطوط مسح متعاقبة فتقع النقط المختارة على خط رأسى قريب من مركز القطع المكافئ ، ويقوم المرقم بأخذ عينات الشدة الضوئية على خط رأسى قريب من مركز لب الشعيرة فالمنحنى المتموج الموضح فى شكل (١١/٦) يمثل تغير الشدة الضوئية على خط رأسى . ويعين الحاسب الآلى مواقع الهدب بأن يبحث عن موضع النهاية الصغري للشدة الضوئية عن طريق مواقع عدد من النقط حول النهاية الصغرى باستخدام طريقة أقل المربعات والتى تقع على قطع مكافئ . ثم يوجه الحاسب الخط الرأسى ليجمع معلومات على جانبى لب الشعيرة التى تستخدم لتعيين البعد بين أى هدبتين متعاقبتين . ثم يتحرك الخط الرأسى بخطوات مقيدة لقياس إزاحة الهدبة التى هى دالة للإحداثى r فى اتجاه نصف القطر مقاسا من منتصف لب الشعيرة أى مركزها ، والدالة الناتجة ونرمز لها بالرمز S (H) هى Δy وتستخدم فى حساب $n(r) - n_{clad}$ طبقا للمعادلة (١١/٤) . وفى النهاية ترسل النتائج لتوزيع معامل الانكسار لجهاز رسم المنحنيات .

(*) محور تناظرى رقمى هو جهاز يستقبل النبضات التناظرية analogue signals الصادرة من الحاسب التناظرى analogue computer ، ويخرجها فى هيئة نبضات رقمية صالحة كمدخلات للحاسب الرقمى .

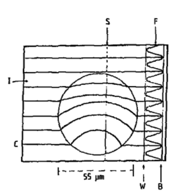
والحاسب القياسى أو التناظرى هو جهاز ألكترونى تم تصميمه لأداء مهمة معينة متأثرا بما يطرأ على مستويات الظواهر التناظرية من تغيرات كالتى تطرأ على مستوى قوة ظاهرة معينة مثل قياس درجة حرارة مادة واتخاذ قرار عند وصولها إلى مستوى معين يتم تحديده مسبقا .



شكل رقم (٤/١١) : بروفيل معامل الانكسار المعين باستخدام الطريقة الأوتوماتيكية لتحليل خريطة هدب التداخل الضوئى . ويوضح المنحنى المستمر الاتفاق مع المعادلة بطريقة أقل المربعات (least squares fit) ($\alpha = 1.97$, $\Delta = 0.0076$, $r_{core} = 24.0$ μm)



شكل رقم (٥/١١) : يبين الأجهزة المستخدمة لإجراء عملية تعيين بروفيل معامل انكسار عبر شعيرة أوتوتيكيا باستخدام ميكروسكوب تداخل ضوئى يقوم على مسار مفرد ، IM ميكروسكوب التداخل ، C كاميرا فيديو ، D مرقم فيديو ، M شاشة العرض ، PC حاسب مبرمج ، P راسم للمنحنيات



شكل رقم (٦/١١) : يوضح طريقة التداخل باستخدام هدب التداخل الثنائي الناتجة من شريحة متساوية السمك عرضية لشعيرة متدرجة معامل انكسار لبها . S يمثل خطا رأسيا يقطع هدب التداخل ويتحرك لمسح خريطة الهدف ، C مؤشر الشاشة cursor (وهو العلامة المضيئة التي تأخذ شكل مربع أو خط مقيد يظهر على شاشة العرض المرئي لتحدد موضع ظهور المعلومة الجديدة) ، F تغير الشدة الضوئية على الخط الرأسي . ويظهر السائل الذي معامل انكساره مساو لمعامل انكسار القشرة عند I (W المرجع الأبيض ،B المرجع الأسود)

٣/١١- التحليل الأوتوماتيكي لخريطة هدب التداخل واستخلاص بروفيل معامل انكسار الشعيرة باستخدام هدب التدخل المستعرضة :

Automatic analysis of interferograms and deduction of the index profile of fibres using a transverse interference pattern :

تم في الفصل الثالث اشتقاق تعبير رياضي لعلاقة إزاحة الهدب S (y) ومعامل الانكسار n_m (r) في الصيغة الآتية :

$$S(y) = \frac{2D}{\lambda} \int_{y}^{R} \frac{\Delta n_m(r)\, r\, dr}{(r^2 - y^2)^{1/2}} \qquad (11.5)$$

وباستخدام تعاكس أبل نحصل على :

$$\Delta n_m(r) = n_m(r) - n_{clad} = -\frac{\lambda}{\pi D} \int_{r}^{R} \frac{dS(y)}{dy} \frac{dy}{(y^2 - r^2)^{1/2}} \qquad (11.6)$$

وقد قدم Boggs et al (١٩٧٩) وكـذلك "Presby et al" (١٩٧٩) وصـفـا لطريقـة أوتوماتيكية لاستخلاص بروفيل معامل الانكسار عبر شعيرة متدرج معامل انكسار لبها مستخدمة هدب التداخل الثنائى التى حصلوا عليها نتيجة إضاءة الشعيرة بحزمة ضوئية عموديا على اتجاه محورها . وفى هذه الطريقة يتم انكسار الضوء الساقط عند السطح الخارجى لقشرة الشعيرة ، وتكون لإزاحة الطور الإضافية والانكسار الناتجين من لب الشعيرة دور ثانوى . لهذا يصبح من المفيد إزالة تأثير القشرة بغمر الشعيرة فى سائل له نفس معامل انكسارها n_{clad} . يمر كل شعاع فى المناطق التى معامل انكسارها متغير ويعبر عن طول المسار OPL بالتكامل $\int_{s1}^{s2} n(S)\, dS$. هذا المتغير S هو طول المسار مقاسا على الشعاع . تغمر الشعيرة فى قطرة من السائل الذى معامل انكساره مساويا لمعامل انكسار القشرة والذى تغمر فيه شيئية الميكروسكوب . هذه هى المكونات الموجودة فى أحد ذراعى ميكروسكوب التداخل فى حين أن الذراع الآخر يحتوى على قطرة من السائل الذى معامل انكساره n_L مساو n_{clad} :

$$n(r) - n_L = -\frac{\lambda}{\pi D}\int_{r}^{R} \frac{dS(y)}{dy}\frac{dy}{(y^2 - r^2)^{1/2}} \qquad (11.7)$$

باستخدام المعادلة السابقة يمكن حساب قيم معامل الانكسار وتوزيعها عبر مقطع الشعيرة باستخدام برنامج حاسب آلى يتناول قيم إزاحة الهدب الناتجة من الإضاءة المستعرضة للشعيرة باستخدام ميكروسكوب التداخل الذى يقوم على مسار مفرد . ولمعالجة البيانات ، أى قيم إزاحة الهدب ، يتطلب إجراء تفاضل يليه تكامل طبقا للمعادلة (٧/١١) .

ولقد قام "Boggs et al" (١٩٧٩) بقياس بروفيل معامل الانكسار بغمر شعيرة طولها حوالى سنتيمتر واحد فى سائل المضاهاة matching index oil ، ووضعت المجموعة فى طريق مسار الضوء فى أحد ذراعى ميكروسكوب تداخل نافذ للضوء Leitz ذى الشعاع المزدوج والمسار المفرد ، كما وضع سمك مماثل من سائل المضاهاة فى الذراع الآخر أى الذراع المرجع ، واستخدم ضوء أحادى الطول الموجى حيث , $\lambda = 0.9\mu$, $n_L = 1.457 \pm 0.0005$.

وقد وجد أن تسخين السائل لتتم المضاهاة أى تساوى معاملى الانكسار $n_L = n_{cald}$ ليس ضروريا . وخطوات العمل هى نفس الخطوات التى أجراها "Wonsiewicz et al"

(١٩٧٦)وكذلك "Presby et al" (١٩٧٨) وهى موضحة بالشكل رقم (٥/١١) ، وهى تشمل تسجيل فيديو وتحويل صورة هدب التداخل إلى رقيمة تحت سيطرة وتحكم برنامج الحاسب الآلى . وقد تم استخدام كاشف من السليكون المنشط بأشعة تحت الحمراء كفديكون . ثم ترسل إشارات الفيديو إلي فيديو محول إلى رقمية له صلاحية معالجة وتشفير عناصر الصورة أى الصور النقطية فى إطار التليفزيون (*) Television frame ويقوم المرقم بفصل ٤٨٠ عنصرصورة أى صورة نقطية على محور y وعدد ٥١٢ عنصر على المحور x ويتم الحصول على قيم y, x كمدخلات بواسطة نظام اتصال مزدوج الاتجاه يسمح بإرسال واستقبال آنى يقوم على ١٦ – بايت مدخلات إلي مخرجات (٠/١) عن طريق وصلة بينيه إلى حاسب آلى رقم 9825 A هيليود – باكر .

16-bit duplex(**) input / output (1/0) interface(***) of a Hewlett-Packard 9825 A computer

ويتم التحويل الى شفرة ٨ بايت أو ٢٥٦ منسوب gray ويستقبل فيديو مرقم بواسطة حاسب ٨ بايت ثنائى(١) على التوازى . ويتصل المرقم بشاشة عرض فيديو تسمح بمشاهدة المنظر الذى يتم معالجته ومراقبة الشفرة على نفس الشاشة ، وهدف عملية التشفير هو تجميع الشدة الضوئية المناظرة لنقاط معروف مواقعها ، وبالتالى يمكن تعيين إزاحة الهدبة من بداية القشرة بدقة كدالة للبعد من مركز الشعيرة . وبتعيين إزاحة الهدبة ، يحسب الحاسب الآلى Δn بواسطة طريقة تعرف بطريقة معامل الانكسار الدائرية ، ونقدم هنا نبذة عنها ثم نرسم بروفيل معامل الانكسار مع الإحداثيات باستخدام راسم xy ويعين الحاسب

---

* إطار ، صورة إشارة إلى وحدة معلومات مثل صفحة بيانات على شاشة العرض المرئى ، ويستخدم هذا التعبير أيضا للاشارة إلى المسار فى الشريط الممغنط باعتباره إطار للمواقع الثنائية .

** نظام اتصال يسمح بانتقال الإشارات فى الاتجاهين فى نفس الوقت . أى إرسال واستقبال آنى .

*** هو جهاز بينى أو وصلة بينية إشارة إلى قناة الوصل التى تحقق الربط بين المعالج المركزى والملحقات الخاصة بنظام الحاسب الآلى أو لتوصيل أى جهازين أو جزئين من أجزاء أى نظام آلى .

(١) إشارة الى اسلوب تناول جميع عناصر وحدة البيانات على التوازى أى متزامنة (فى نفس الوقت) دون تتابع أو ترتيب بينها ، وهو فى هذه الحالة يشير إلى زوج من الحالات أو الأشياء كما فى نظام الترقيم الثنائى حيث يستخدم رقمان فقط هما (١,٠) ومثل حالة مصباح كهربى إما مضئ أو مطفأ

الآلى أكثر المنحنيات اتفاقا وقيمة الدالة الأسية التى تعبر عنه ، ونستخلص قيمة α فى المعادلة الأصلية لبروفيل الانكسار للألياف متدرجة معامل انكسار لبها .

وكما شرحنا ، تتم معالجة أوتوماتيكية لمخرجات الميكروسكوب باستخدام نظام يقوم على فيديو – مرقم – حاسب آلى متحكم مسيطر ، ونحصل على بروفيل معامل الانكسار عن طريق حل المعادلة التكاملية . والنتائج التى يتم الحصول عليها تكون reproducible إلى حوالى ١٪ ويمكن تعيينها فى مدة تصل إلى بضع دقائق من إنتاجها تتفق مع التوزيع المطلوب المثالى Optimam .

وقد أفاد "Presby et al" (١٩٧٩) بأن الحل الكامل للمعادلة التكاملية رقم (٧/١١) يمكن من استخلاص قيم n (r) عند كل نقطة تبعد r عن مركز لب الشعيرة من إزاحة الهدبة S (y) وذلك بإجراء تفاضل ثم تكامل . ولما كانت إزاحة الهدبة معلومة عند مواقع محددة فقط ، فإنه تستخدم الحلول العددية numerical techniques المقربة للتفاضل وكذلك للتكامل . وتتوقف درجة الدقة فى نتائج بروفيل معامل الانكسار على درجة الدقة فى قياس S (y) ، على كثافة النقط التى يتم قياس S (y) عندها والطرق المستخدمة فى الحسابات العددية ودقتها .

من طريقة التحليل التى قام بها "Boggs et al" (١٩٧٨) والتى تعرف بطريقة المعامل الدائرى ، افترض أن الأشعة تمر خلال لب الشعيرة دون انعطاف وأن طورها يتأخر تبعا لطول مسار الضوء . بالإضافة افترض أن الشعيرة تتكون من عدد كبير من الحلقات متحدة المركز ، معامل انكسار كل منها ثابت ، وقد أمكنهم حساب معامل الانكسار خطوة – خطوة ، بادئين بالحلقة الأولى ومتجهين نحو المركز أو المنتصف ، إذ أنه يمكن حساب معامل انكسار أية حلقة إذا كانت قيم معاملات انكسار الحلقات التى تسبقها سبق معرفتها .

وينبغى أن نذكر أنه فقط فى حالة التداخل الضوئى التفاضلى-differential interferometry مثلا عند استخدام مقياس التداخل لماخ و زندر مع وجود جهاز قص shearing – كما أوردنا فى الفصل الثالث – أن توزيع معامل الانكسار تعطيه مباشرة المعادلة رقم (٧/١١) كما يلى :

$$\Delta n(r) = -\frac{\lambda}{\pi D s}\int_{r}^{R} S(y)\frac{dy}{(y^2 - r^2)^{1/2}} \qquad (11\text{-}8)$$

حيث ترمز S إلى الإزاحة العرضية بين الشعاعين وفى هذه الحالة لانحتاج إلي المعامل التفاضلي .

وفى الخاتمة ، نقول بأن النظام الذى يشمل ميكروسكوب التداخل ، وفيديكون كاميرا ، ومرقم فيديو وشاشة عرض ، وحاسبا مبرمجا وراسما للمنحنيات – مناسب لإجراء عملية التعيين الأوتوماتيكي لبروفيل معامل انكسار الألياف عند تطبيق طريقة التداخل القائمة على الهدب المتكونة من شريحة مستعرضة من الشعيرة ، أى طريقة التداخل المستعرضة ، وكذلك عند تناول هدب التداخل الثنائى أو هدب التداخل المتعدد ، وكذلك ميكروسكوبات التداخل القائمة على المسار المفرد والمسار المزدوج .

وفى كل حالة نحصل على خريطة لهدب التداخل ونسجلها وترى من خلال كاميرا فيديو ، يلى ذلك مرقم فيديو وشاشة عرض . ومن الواضح أن طرق الحصول على هدب التداخل تختلف فى فرق طول مسار الأشعة التى تتداخل وبالتالى فى العلاقات التى تربط معامل الانكسار وإزاحة الهدبة ، ويحتاج ذلك إلى البرنامج المناسب لاستخلاص بروفيل معامل الانكسار للشعيرة . وفى حالة خريطة هدب التداخل الناتجة من استخدام شريحة عرضية من الشعيرة توجد علاقة خطية بين Δn (r) وإزاحة الهدبة Δy تعبر عنها المعادلة رقم (١١-٤) ، فى حين أنه فى حالة نظام التداخل التى تسقط حزمة الأشعة وحيدة الطول الموجى المتوازية علي الشعيرة عموديا على اتجاه محورها transverse interference systems تتبع العلاقة بين S (y), Δ n (r) المعادلة التكاملية رقم (١١-٧) ، معادلة تعاكس آبلAbel's integral equation . ويوضح حلها أن Δn (r) عند أية نقطة على لب الشعيرة يمكن الحصول عليها من إزاحة الهدبة S (y) بإجراء التفاضل أولا يعقبه التكامل . وفى التداخل التفاضلى نحصل على توزيع معامل الانكسار بطريقة مباشرة من معادلة التكامل التى لاتتطلب إجراء تفاضل مسبق .

References

Billingsley F D 1971 Digitization and storage of the image in *Advances in Optical and Electron Microscopy* ed. R Barer and V E Cosslett vol. 4 (London: Academic) pp 127-70

Boggs L.M, Presby H M and Marcuse D 1979 *Bell Syst. Tech. J.* **58** 867

Eccles M J, McCarthy B D and Rosen D 1976 a *J. Microsc.* **106** 33

—— 1976b *J. Microsc.* **106** 43

Hopkins H H 1943 *Proc. Phys. Sco.* **55** 116

Marcuse D and Presby H M 1980 *Proc. IEEE* **68** 676

Presby H M, Marcuse D and Astle H W 1978 *App. Opt.* **17** 2209

Presby H M, Marcuse D, Astle H W and Boggs L M 1979 *Bell Syst. Tech. J.* **58** 883

Rosen D 1984 Instruments for optical microscope image analysis in *Advances in Optical and Electron Microscopy* ed. R Barer and V E Cosslett vol. 4 (London: Academic) pp 323-45

Wonsiewicz B C, French W G, Lazay P D and Simpson J R 1976 *Appl. Opt.* **15** 1048.

المصطلحات العلمية

Abel inversion	تعاكس آبل
Achromatic fringe	هدبة لالونية
Acrilan fibres	ألياف الاكريلان
Airy formula	صيغة ايرى
Airy summation	تجميع ايرى
Amplitude	سعة
Anisotropic fibres	ألياف متباينة الخواص الضوئية
Aperture numerical	الاتساع العددى
Attenuation coefficient	معامل الاضمحلال
Automatic analysis of interferograms	تحليل أتوماتيكى لخريطة هدب التداخل الضوئى
Avogadro's number	عدد افوجادرو
Axes optic of crystal	المحور البصرى للبللورة
Babinet compensator	معادل بابينيت
Back-scattering from fibres	التشتت الخلفى من الألياف
along fibre axis	فى اتجاه محور الشعيرة
perpendicular to fibre axis	فى الاتجاه العمودى على محور الشعيرة
Back-Scattering measurement	قياس التشتت الخلفى
Beam splitter	مجزءحزمة الأشعة
Becke-line method	طريقة الحد الفاصل لبيك
Bessel function	دالة بسل
Biaxial crystal	بلورة ثنائية المحور
Bi-prism Fresnel's	المنشور المزدوج لفرنيل
Birefringence	الانكسار المزدوج
accuracy of measurement	دقة القياس
lateral	الجانبى (العرض)

measurement	قياسى
radial	فى اتجاه نصف القطر
Birefringent prism	منشور الانكسار المزدوج
Bond polarisability	استقطابية الروابط الكيميائية
Cashmeline fibres	ألياف الكاشميلون
Cauchy's dispersion of fibres	صيغة التفرق الضوئى لكوشى
Chemical vapour deposition, Modified	الطريقة الكيميائية المعدلة لتكوين الألياف بترسيب الأبخرة
Coherence length	طول الترابط
Core of fibres	لب الشعيرات
Cotton fibres	ألياف القطن
Courtelle fibres	ألياف الكورتل
Crystal	بللورة
growth features	معالم النمو البلورى
silicon carbide	كربيد السيليكون
topography	تضاريس السطح
Damage in fibres by γ-rays	الإتلاف فى الألياف بأشعة جاما
by neurons	بالنيوترونات
Digitisation	ترقيم
image	تحويل الصورة إلى أرقام
signal	تحويل الإشارة إلى أرقام
spatial	فراغى
Digitiser	مرقم
Dispersion of spectrograph	تفرق المطياف
Division of amplitude	تقسيم السعة
Division of wavefront	تقسيم جبهة الموجة
Double refraction	الانكسار المزدوج
Dralon fibres	ألياف الدرالون

Draw ratio	نسبة السحب
Polypropylene fibres	ألياف البولى بروبيلين
Fabry-Perot interferometer	مقياس التداخل لفابرى وبيرو
Feussner surface	سطح فايزنر
Fibres	ألياف
anisotropic	متباينة الخواص
diameter determination	تعيين القطر
dispersion properties	خاصية التفرق الضوئى
effect of γ-irradiation	تأثير التشعيع بأشعة جاما
flax	الكتان
gamma irradiation	التشعيع بأشعة جاما
heterogeneous	ألياف غير المتجانس
highly oriented	ألياف انتظمت غالبية جزيئتها فى اتجاه محورها
homogeneous	ألياف متجانسة
homogeneous sylindrical	ألياف إسطوانية متجانسة
irregular transverse sections	مقاطع عرضية غير منتظمة
multilayer	متعدد الطبقات
natural	ألياف طبيعية
optical	ألياف بصرية
physical properties	الخصائص الفيزيائية
opto-mechanical	الخصائص الضوئية – الميكانيكية
opto-thermal	الخصائص الضوئية – الحرارية
radius determination	تعيين نصف قطر الشعيرة
refractive index determination	تعيين معامل انكسار مادة الشعيرة
regular transverse sections	مقطع عرضى منتظم
skin-core structure	قشرة ولب الشعيرة
steam stretched acrylic	ألياف الاكريلك المشدودة فى جو من البخار
structure	تركيب

surface topography	تضاريس السطح
synthetic	ألياف تركيبية
Fibrous materials	الألياف
Fizeau fringes	هدب التداخل الضوئى لفيزو
localised	محددة الموقع
multiple-beam	متعددة الأشعة
shape	شكل الهدب
Fizeau method	طريقة فيزو
Fresnel biprism	المنشور المزدوج لفرنيل
Fringe pattern	توزيع الشدة الضوئية
intensity distribution	فى مجموعة هدب
Fringes	هدب
equal chromatic order	هدب تساوى الرتبة اللونية
equal tangenital inclination	هدب تساوى ميل المماس
equal thickness	هدب تساوى السمك
multiple beam formation	تكوين هدب التداخل المتعدد
analysis of elements	تحليل عناصر التكوين
at reflection	عند الانعكاس
in transmission	عند النفاذ
intensity distribution	توزيع الشدة الضوئية
localisation	موقع الهدب
phase lage	تخلف الطور
silvered liquid wedge with fibre inserted	مسطحان ضوئيات مفضضان يميل أحدهما على الآخر يحصران سائل غمرت فيه شعيرة
visibility	تباين الهدب
zero-order	الهدبة الصفرية
Fourier transform of the Gaussian function	تحولات فورير لدالة جاوس

Gabor reconstruction of wavefronts	إعادة بناء جبهات الموجة لجابور
Graded index optical fibres	ألياف بصرية معامل انكسار لبها يقل مع البعد عن مركز الشعيرة
Graded index profile	بروفيل معامل انكسار الألياف
Grating spectrograph	مطياف محزوز الحيود
Group velocity	سرعة المجموعة
Hartman's formula	صيغة هارتمان
Highly oriented fibres	ألياف ذات انكسار مزدوج عال
Hologram	هولوغرام
Holographic interferometry	التداخل الضوئى الهولوغرافى
Holography	الهولوغرافيا
Huygen's principle	مبدأ هايجنز
Image splitting	انقسام الصور
Index profile of fibres	بروفيل معامل انكسار الألياف
calculation	حساب
step-pyramid like	على شكل هرمي مدرج
Intensity distribution in fringe	توزيعا لشدة الضوئية لهدب
multiple-beam at reflection	التداخل الضوئى المتعدد
multiple-beam in transmission	عند الانعكاس وعند النفاذ
two-beam	التداخل الثنائى
Interference fringes	هدب التداخل الضوئى
at reflection	عند الانعكاس
multiple-beam	الأشعةمتعددة
sharpness	حدة
two-beam	هدب التداخل الضوئى الثنائى
applied to fibre suface topography	لدراسة تضاريس سطح الألياف
spliced optical fibres	الألياف البصرية الموصولة
Interference in crystals	التداخل الضوئى فى البلورات

Interference microscope	ميكروسكوب التداخل الضوئى
	ميكروسكوب التداخل الضوئى
automated	ذات التحكم الأوتوماتيكى
Baker	ميكروسكوب التداخل الضوئى لبيكر
Dyson	ميكروسكوب التداخل الضوئى لدايسون
Interphako	ميكروسكوب التداخل الضوئى (انترفاكو)
Leitz	ميكروسكوب التداخل الضوئى (ليتز)
Linnik	ميكروسكوب التداخل الضوئى (لينيك)
Pluta	ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا
Polarising	ميكروسكوب التداخل الضوئى المستقطب
Shearing effect	ازدواج الصورة فى ميكروسكوب التداخل الضوئى
Tolansky	ميكروسكوب التداخل الضوئى لتولانسكى
two-beam	الثنائى
two-beam single-pass	أحادى المسار
variable double refracting (VDRI)	انكسار مزدوج متغير
Zeiss-Linnik	ميكروسكوب التداخل الضوئى (زايس لينيك)
Interference of plane polarised light	تداخل الأشعة المستقطبة فى مستوى
Interference pattern	هدب التداخل الضوئى
Intergerograms	صور التداخل الضوئى
analysis	تحليل صور التداخل الضوئى
automated analysis	تحليل صور التداخل الضوئى أتوماتيكيا
Interferometer	مقياس التداخل الضوئى
double-pass	ثنائية المسار
Fabry-Perot	لفابرى وبيرو
Jamin	لجامن
Mach-Zehnder	لماخ وزندر
Michleson	لميكلسون
Single-pass	أحادى المسار

wedge	على شكل إسفين
Interferometric slab method	التداخل الضوئى باستخدام شريحة على شكل قرص من الشعيرة
accuracy	دقة
Interferometry	التداخل الضوئى
differential	التفاضلى
fibre	ألياف
holograhic	هولوغرافى
speckle	بقيعات ضوئية
substraction	التداخل الضوئى بالطرح
Irradiation effect, γ on refractive index of	تأثير التشعيع بأشعة جاما
optical fibre	ألياف بصرية
synthetic fibre	ألياف تركيبية
Isotropic homogeneous medium	وسط متجانس ومتماثل ضوئيا
Kevlar 49 fibres	أليا الكفلار ٤٩
Laser	ليزر
He-Ne	ليزر الهيليوم – نيون
injection	ليزر الحقن
Lateral birefringence of fibres	الانكسار المزودج الجانبى للألياف
Light emitting diodes (LED)	ثنائى باعث الضوء
Lorentz-Lorenz expression	صيغة لورنتز – لورنز
Matching cell	خلية تحوى سائل معامل انكساره مساو لمعامل انكسار قشرة الشعيرة
Mechanical anisotropy	التباين فى الخواص الميكانيكية
Mica	ميكا
muscovite	مسكوفيت ميكا
phlogopite	فلوجوبايت ميكا
surface topography	تضاريس سطح الميكا

Microstrain device	جهاز لقياس الشد الضئيل
	الطريقة الكيميائية المعدلة لتحضير الألياف بترسيب
Modified chemical vapour deposition (MCVD)	الأبخرة
Mohair wool fibres	ألياف صوف الموهير
Multilayer coating	الطلاء بعده طبقات
Multiple-beam	تطبيق طرق التداخل الضوئى المتعدد
applied to surface topography	تطبيق دراسة تضاريس السطح
in transmission	عند النفاذ
at reflection	وعند الانعكاس
	النظام البصرى المستخدم للحصول على هدب
Fizeau experimental arrangement for formation	التداخل الضوئى
in transmission	عند النفاذ
at reflection	عند الانعكاس
Fizeau fringes	هدب التداخل الضوئى المتعدد لفيزو
intensity distribution	توزيع الشدة الضوئية
interference	التداخل
interference fringes	هدب التداخل الضوئى
	أنظمة التداخل الضوئى التى تنتج محددة الموقع
Localised interference systems	
reflected system	هدب التداخل الضوئى المتعدد الناتجة بالانعكاس
Natural fibres	ألياف طبيعية
Newton's ringes	حلقات نيوتن
Non-destructive technique	الطريقة (غير المتلفة) اللاإتلافية
Numerical aperture (NA)	الاتساع العددى
Nylon 6	نايلون ٦
Nylon 66	نايلون ٦٦
Object	جسم

amplitude	جسم يغير سعة الموجة
phase	جسم يغير طور الموجة
Optical absorption	امتصاص ضوئى
Optical anisotropy	تباين ضوئى
Cotton	ألياف القطن
Optical communication systems	نظم التراسل الضوئى
Optical fibres	ألياف بصرية
calculation of index profile	حساب برفيل معامل الانكسار
effect of γ-irradiation	تأثير التشعيع بأشعة جاما
graded index	برفيل ألياف بصرية معامل انكسار لبها يقل مع البعد عن مركز الشعيرة
graded index profile	بروفيل معامل الانكسار للألياف البصرية متدرجة معامل الانكسار
monomode	الانكسار – وحيدة المنوال
multimode	عديدة المنوال
optical properties	الخصائص الضوئية
refractive index measurement	قياس معامل الانكسار
refractive index profile	بروفيل معامل الانكسار
single mode	وحيدة المنوال
step index	بروفيل معامل الانكسار من درجة واحدة
waveguides	موجه الموجة
Optical Fourier transforms	تحولات فورير الضوئية
Optical microscopy	الميكروسكوب الضوئى
Optical path length	طول المسار الضوئى
Optical waveguides	موجهات الموجات الضوئية
Opto-mechanical properties of fibres	الخصائص الضوئية – الميكانيكية للألياف
Opto-thermal properties of fibres	الخصائص الضوئية – الحرارية للألياف
Phase change in transmission	تغير طور الأشعة عند نفاذها

Phase change on reflection	تغير طور الأشعة عند انعكاسها
Phlogopite mica	ميكا الفلوجوبيت
Photodetectors	كواشف ضوئية
Pticture analysis	تحليل الصورة
Planes of localisation	مستويات مواقع الهدب
Pluta microscope	ميكروسكوب التداخل الضوئى لبلوتا
Polyester fibres	ألياف البولى استر
Polyethylene fibres	ألياف البولى إيثيلين
Polyethylene terephthalate fibres	ألياف البولى ايثلين تيرفيثاليت
Poly (p-phenylene terephthalamide)	ألياف البولى (ب فينيلين تيرفيتاليميد)
Polypropylene fibres	ألياف البولى بروبيلين
Ramie fibres	ألياف الرامى
Rayleigh scattering	تشتت رالى
Rayleigh's refractometer	مقياس معامل الانكسار لرالى
Reconstruction of wavefront	إعادة بناء جبهة الموجة
Refractive index	معامل الانكسار
accuracy of the measurement	الدقة فى درجة القياس
measurement	قياس
profile of fibres	بروفيل معامل انكسار الألياف
variation	تغير معامل الانكسار
Scanning electron microscope	الميكروسكوب الألكترونى الماسح
Scanning microdensitometer	جهاز قياس الشدة الضوئية
Scattering (see Back-Scattering)	التشتت الخلفى
Rayleigh	تشتت رالى
Skin of fibres	قشرة الشعيرات
Snell's law	قانون سنيل
Speckle	البقيعات الضوئية
Speckle interferometry	التداخل الضوئى الناتج من البقيعات الضوئية

double exposure	ثنائية التعريض
Speckle photography	التسجيل الفوتوغرافى للبقيمات الضوئية
double exposure	ثنائية التعريض
Spectrograph	المطياف
dispersion	التفرق الضوئى للمطياف
magnification	تكبير المطياف
Splices	لحام
Splicing process	عملية اللحام
examine quality	فحص جودة طريقة اللحام
Storage of the image	تخزين الصورة
Structure of fibre, method	تركيب الألياف
synthetic	التركيبية
optical	الضوئية
Surface features	خصائص السطح
Surface of localisation	أسطح مواقع الهدب
Surface topography	تضاريس السطح
crystal	للبلورات
fibres	للألياف
Synthetic fibres	الألياف التركيبية
Television microscope	الميكروسكوب التليفزيونى
Terylene fibres	ألياف الترلين
Twaron fibres	ألياف التاورون

To-beam interference

تطبيق طرق التداخل الثنائى على الألياف

applied to fibres with irregular cross-sections

ذات المقاطع العرضية المنتظمة وغير المنتظمة

applied to fibres with regular cross-sections

Uniaxial crystal	بلورة أحادية المحور البصرى

Viscose rayon fibres	ألياف رايون الفسكوز
Visibility of fringes	درجة تباين هدب التداخل وعلاقتها
relation to coherent length	بطول ترابط موجات المصدر
Wollaston prism	منشورولاستون
wool fibres	ألياف الصوف
Young's double-slit	تجربة الشق المزدوج ليونج
Young's fringes	هدب التداخل الضوئى ليونج
Zeiss-Linnik	زايس – لنيك
Zero-order fringe	الهدبة الصفرية

رقم الإيداع ٢٦٢٢ ـ ٩٣

الترقيم الدولى ٦ ـ ٩٩ ٠٠ ـ ١٥ ـ ٩٧٧

مطابع الوفاء ـ المنصورة

شارع الإمام محمد عبده المواجه لكلية الآداب

ت : ٣٤٢٧٢١ - ص.ب : ٢٣٠

تلكس : ٢٤٠٠٤ DWFA UN

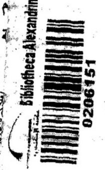
المؤلفان

الأستاذ الدكتور نايل بركات

أستاذ الفيزياء التجريبية بكلية العلوم جامعة عين شمس ، كون مدرسة علمية فى البصريات والطيف التطبيقى والليزر وبصريات الألياف . أقام وأشرف على وحدة المعايرة الضوئية للأطوال بالمعهد القومى للمعايرة . حصل على جائزة الدولة التشجيعية مرتين عامى ١٩٥٨ ، ١٩٦٣ وجائزة الدولة التقديرية عام ١٩٩٠ . له أكثر من تسعين بحثا منشورا فى الدوريات العالمية وحائز على وسام العلوم والفنون من الطبقة الأولى عام ١٩٥٩ ووسام الجمهورية من الطبقة الثالثة عام ١٩٥٦ ومن الطبقة الثانية عام ١٩٧٥ . شارك فى تأليف هذا الكتاب باللغة الإنجليزية الذى ظهر فى السلسلة الدولية فى مجال البصريات والبصريات الألكترونية عام ١٩٩٠ . زميل بمعهد الفيزياء بإنجلترا . حصل على درجة الدكتوراه فى العلوم D. Sc. من جامعة لندن عام ١٩٩٢ .

الأستاذ الدكتور أحمد أمين حمزه

أستاذ الفيزياء ونائب رئيس جامعة المنصورة . له أكثر من ستين بحثا منشورا فى الدوريات العالمية . شارك فى تأليف هذا الكتاب باللغة الإنجليزية الذى ظهر فى السلسلة الدولية فى مجال البصريات والبصريات الألكترونية عام ١٩٩٠ . حصل على جائزة الدولة التشجيعية فى العلوم الفيزيقية عام ١٩٨٧ وجائزة جامعة المنصورة ا
الأساسية لعام ١٩٩١ . زميل بمعهد الفيزياء بإنجلترا وزميل الجمعيا
للميكروسكوب وعضو الجمعية الدولية للهندسة البصرية .



Adam Hilger
Adam Hilger
Bristol and New York


دار النشر للجامعات المصرية
مكتبة الوفاء